



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# ZMĚNA PALIVOVÉ ZÁKLADNY UHELNÉHO KOTLE

CHANGING THE FUEL BASE OF THE COAL BOILER

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Přikryl

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

BRNO 2019



## Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: Bc. Josef Příkryl  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Energetické inženýrství  
Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Změna palivové základny uhelného kotle

**Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Změna palivové základny stávajícího kotle je častou alternativou k úplné výměně zařízení. Náplní práce bude kontrolní výpočet stávajícího kotle a návrh úprav při změně hlavního paliva z hnědého uhlí na zemní plyn.

Parametry 125 t/h; 9,4 MPa; 540°C.

**Cíle diplomové práce:**

Výpočet teplosměnných ploch pro hnědé uhlí.

Kontrolní výpočet kotle pro zemní plyn.

Návrh nezbytných úprav kotle při přechodu na zemní plyn.

**Seznam doporučené literatury:**

BASU, Prabir, Cen KEFA a Louis JESTIN. Boilers and burners: design and theory. 1. New York: Springer, c2000. Mechanical engineering series (Berlin, Germany). ISBN 03-879-8703-7.

BUDAJ, Florian. Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet. 4. přeprac. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992.

ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle: technický průvodce svazek 32. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce (SNTL-Nakladatelství technické literatury).

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03757-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Diplomová práce obsahuje výpočty plynofikace uhelného kotle. V první části jsou uvedeny stechiometrické výpočty, výpočty tepelné bilance a výpočet spalovací komory. Následují výpočty jednotlivých teplosměnných ploch zakončené výpočtem ohříváku vzduchu a celkovou bilancí kotle. Výpočty jsou provedeny s ohledem na zachování parametrů páry, investiční náklady a do dodržení emisních limitů.

## **Abstract**

The diploma thesis contains calculations of gasification of coal boiler. The first part of thesis contains stoichiometric calculations, heat balance and calculations of combustion chamber. In the next part are calculations of heat exchange surfaces and at the end of this part are calculations of regenerative air heater and total boiler balance. Calculations are made by regard to investments costs, preservation of the steam parameters and keeps emissions limits.

## **Klíčová slova**

Plynofikace, kotel, teplosměnná plocha, tepelný výpočet.

## **Key words**

Gasification, boiler, heat exchange surface, thermal calculation.

## Bibliografická citace

PŘIKRYL, Josef. *Změna palivové základny uhelného kotle* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113146>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Zdeněk Skála.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně na základě rad vedoucího práce a konzultanta práce, s použitím odborné literatury a dalších dostupných zdrojů.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora práce)

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Skálovi, CSc. a konzultantovi panu Ing. Robertu Bursovi ze společnosti PROVYKO za cenné rady, připomínky a vedení diplomové práce. Dále musím poděkovat rodičům a rodině za podporu během mých studií.

## Obsah

1 Úvod .....	12
2 Objemy a entalpie vzduchu a splain .....	13
2.1 Stechiometrie.....	13
2.2 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalín.....	15
2.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování .....	16
2.4 Entalpie spalín při recirkulaci.....	18
3 Tepelná Bilance kotle .....	20
3.1 Teplo přivedené do kotle .....	20
3.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost.....	20
3.2.1 Ztráta chemickým nedopalem .....	20
3.2.2 Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí.....	20
3.2.3 Ztráta citelným teplem spalín .....	21
3.2.4 Tepelná účinnost kotle.....	21
3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva.....	21
3.4 Množství paliva .....	22
3.5 Tlaky média v jednotlivých výhřevných plochách.....	22
4 Výpočet Spalovací komory .....	23
4.1 Tepelný výpočet ohniště.....	24
4.1.1 Součinitel M .....	24
4.1.2 Boltzmanovo číslo .....	25
4.1.3 Teplota spalín na výstupu z ohniště.....	25
4.1.4 Stupeň černosti ohniště.....	26
4.1.5 Součinitel zeslabení sálání nesvitivými tříatomovými plyny .....	26
4.1.6 Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn.....	27
4.1.7 Střední tepelné zatížení stěn ohniště.....	28
5 Oblast deskového ohříváku .....	29
5.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín.....	29
5.2 Výstupní (krajní) deskový přehřívák .....	30
5.2.1 Součinitel prostupu tepla: .....	30
5.2.2 Střední logaritmický teplotní spád.....	34
5.2.3 Rovnice sdílení tepla .....	34
5.3 Vstupní (středový) deskový přehřívák .....	35
5.3.1 Součinitel prostupu tepla: .....	35
5.3.2 Střední logaritmický teplotní spád.....	37
5.3.3 Rovnice sdílení tepla .....	38



5.4 Výparník v oblasti deskového přehříváku.....	38
5.4.1 Součinitel prostupu tepla: .....	38
5.4.2 Střední logaritmický teplotní spád .....	40
5.4.3 Rovnice sdílení tepla .....	40
5.5 Část stropového přehříváku v oblasti deskového přehříváku.....	41
5.5.1 Součinitel prostupu tepla: .....	41
5.5.2 Střední logaritmický teplotní spád .....	43
5.5.3 Výhřevná plocha .....	43
5.5.4 Rovnice sdílení tepla .....	44
5.6 Bilance celé oblasti deskového přehříváku .....	44
5.6.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla .....	44
6 Oblast výstupního přehříváku .....	45
6.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín.....	45
6.2 Oblast výstupního přehříváku .....	46
6.2.1 Součinitel prostupu tepla.....	46
6.2.2 Střední logaritmický teplotní spád .....	50
6.2.3 Výhřevná plocha .....	50
6.2.4 Rovnice sdílení tepla .....	50
6.3 Část výparníku v oblasti výstupního přehříváku.....	50
6.3.1 Součinitel prostupu tepla.....	50
6.3.2 Střední logaritmický teplotní spád .....	52
6.3.3 Výhřevná plocha .....	52
6.3.4 Rovnice sdílení tepla .....	52
6.4 Část stropního přehříváku v oblasti výstupního přehříváku.....	53
6.4.1 Součinitel prostupu tepla.....	53
6.4.2 Střední logaritmický teplotní spád .....	55
6.4.3 Výhřevná plocha .....	55
6.4.4 Rovnice sdílení tepla .....	56
6.5 Bilance celé oblasti deskového přehříváku .....	56
6.5.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla .....	56
7 Oblast mříže výparníku .....	57
7.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín.....	57
7.2 Oblast mříže výparníku .....	58
7.2.1 Součinitel prostupu tepla: .....	58
7.2.2 Střední logaritmický teplotní spád .....	60
7.2.3 Výhřevná plocha .....	60

7.3 Rovnice sdílení tepla .....	60
7.3.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla.....	61
8 Oblast přehříváku P4 .....	62
8.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalin .....	62
8.2 Oblast přehříváku P4 .....	63
8.2.1 Součinitel prostupu tepla .....	63
8.2.2 Efektivní tloušťka sálové vrstvy .....	65
8.2.3 Střední logaritmický teplotní spád.....	66
8.2.4 Výhřevná plocha.....	67
8.2.5 Rovnice sdílení tepla .....	67
8.3 Část stropního přehříváku v oblasti přehříváku P4.....	67
8.3.1 Součinitel prostupu tepla .....	67
8.3.2 Střední logaritmický teplotní spád.....	70
8.3.3 Výhřevná plocha.....	71
8.3.4 Rovnice sdílení tepla .....	71
8.4 Bilance celé oblasti deskového přehříváku.....	71
8.4.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla.....	71
9 Oblast přehříváku P5 .....	72
9.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalin .....	72
9.2 Oblast přehříváku P5 .....	73
9.2.1 Součinitel prostupu tepla .....	73
9.2.2 Efektivní tloušťka sálové vrstvy .....	75
9.2.3 Střední logaritmický teplotní spád.....	76
9.2.4 Výhřevná plocha.....	77
9.2.5 Rovnice sdílení tepla .....	77
9.3 Část stropního přehříváku v oblasti přehříváku P5.....	77
9.3.1 Součinitel prostupu tepla .....	77
9.3.2 Střední logaritmický teplotní spád.....	80
9.3.3 Výhřevná plocha.....	80
9.3.4 Rovnice sdílení tepla .....	81
9.4 Bilance celé oblasti deskového přehříváku.....	81
9.4.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla.....	81
10 Oblast mříže výparníku .....	82
10.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalin .....	82
10.2 Oblast mříže stropového přehříváku.....	83
10.2.1 Součinitel prostupu tepla: .....	83

10.2.2 Efektivní tloušťka sálové vrstvy .....	85
10.2.3 Střední logaritmický teplotní spád .....	86
10.2.4 Výhřevná plocha .....	86
10.2.5 Rovnice sdílení tepla .....	86
10.2.6 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla .....	87
11 Oblast Ekonomizéru .....	88
11.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín .....	88
11.2 Oblast ekonomizéru .....	89
11.2.1 Součinitel prostupu tepla .....	89
11.2.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalín pro příčné proudění .....	89
11.2.3 Střední logaritmický teplotní spád .....	91
11.2.4 Výhřevná plocha svazku .....	92
11.2.5 Rovnice sdílení tepla .....	92
11.2.6 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla .....	92
12 Oblast regeneračního ohříváku vzduchu typu Ljungström .....	93
12.1 Rovnice tepelné bilance na straně média .....	93
12.2 Rovnice tepelné bilance na straně spalín .....	93
12.3 Oblast ohříváku vzduchu .....	94
12.3.1 Střední logaritmický teplotní spád .....	96
12.3.2 Součinitel prostupu tepla .....	96
12.3.3 Součinitel přestupu tepla na straně spalín .....	97
12.3.4 Součinitel přestupu tepla na straně vzduchu .....	98
12.4 Tepelný výkon horkého konce .....	99
12.5 Tepelný výkon studeného konce .....	99
12.6 Celkový tepelný výkon ohříváku .....	99
12.6.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla .....	99
13 Celková bilance kotle .....	100
13.1 Odchylka .....	100
14 Závěr .....	101
15 Seznam použité literatury .....	102
16 Seznam tabulek .....	102
17 Seznam obrázků .....	102
18 Seznam použitých symbolů .....	103
19 Seznam příloh .....	107

## 1 Úvod

Počítané zařízení je dvoutahový kotel. Původní palivo je hnědé uhlí. Kotel se skládá ze spalovací komory, na jejíchž stěnách jsou umístěné trubky výparníku. V komoře se nachází čtyři hořáky, jejichž polohu bude nutné s největší pravděpodobností měnit.

Za spalovací komorou je oblast deskového přehříváku, která obsahuje samotný deskový přehřívák, který je složen ze 3 vstupních a 4 výstupních šotů. Do oblasti zasahuje výparník a začátek stropového přehříváku, který pokračuje až do oblasti přehříváku P5.

Za oblastí deskového přehříváku je oblast výstupního přehříváku, ve které se kromě výstupního přehříváku a stropového přehříváku, nachází část výparníku. Trubky výparníku ústí do mříže výparníku nacházející se za výstupním přehřívákem.

Za mříží se nachází oblast přehříváku P4 za níž následuje oblast přehříváku P5. Za oblastí P5 je mříž stropového přehříváku.

Za mříží je obrátová komora, za níž je ekonomizér, jehož konstrukce se bude muset rovněž měnit. Na konci druhého tahu za ekonomizérem se nachází regenerativní ohřívák vzduchu typu Ljungström.

Cílem práce je přepočít stávajícího zařízení pro spalování zemního plynu, přičemž budou dodrženy stávající parametry páry. Na základě výpočtu pak navrhnout konstrukční úpravy kotle s ohledem na co nejnižší investiční náklady.

Pro všechny výpočty, pokud není uvedeno jinak, je použito postupů, rovnic a značení proměnných z [2]. Výpočet je realizován v programu Microsoft Excel 2007.

## 2 Objemy a entalpie vzduchu a splain

Hnědé uhlí je nahrazeno plynem, jehož složení je uvedeno v tabulce 2-1.

$N_2$	<b>0,8</b>	%
$O_2$	<b>0,005</b>	%
$CO_2$	<b>0,29</b>	%
$CH_4$	<b>97,43</b>	%
$C_2H_6$	<b>1,02</b>	%
$C_3H_8$	<b>0,315</b>	%
$C_4H_{10}$	<b>0,15</b>	%
$Q_i^r$	<b>35,99</b>	$MJ/Nm^3$

Tab. 2-1 Složení zemního plynu

### 2.1 Stechiometrie

**Minimální množství kyslíku potřebného ke spálení 1 m<sup>3</sup> suchého plynu:**

$$O_{O_2} = 0,5 \cdot \frac{CO + H_2}{100} + 1,5 \cdot \frac{H_2S}{100} + \sum \left( x + \frac{y}{4} \right) \cdot \frac{C_x H_y}{100} - \frac{O_2}{100} \quad (2.1.1)$$

$$O_{O_2} = 0,5 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + \left( 1 + \frac{4}{4} \right) \cdot \frac{97,43}{100} + \left( 2 + \frac{6}{4} \right) \cdot \frac{1,02}{100} + \left( 3 + \frac{8}{4} \right) \cdot \frac{0,315}{100} + \left( 4 + \frac{10}{4} \right) \cdot \frac{0,14}{100} - \frac{0,005}{100}$$

$$O_{O_2} = 2,0091 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

**Minimální množství suchého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1 m<sup>3</sup> plynu:**

$$O_{VZ \min}^S = \frac{O_{O_2}}{0,21} \quad (2.1.2)$$

$$O_{VZ \min}^S = \frac{2,0091}{0,21}$$

$$O_{VZ \min}^S = 9,5671 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

**Minimální množství vlhkého vzduchu potřebného ke spálení 1 m<sup>3</sup> plynu:**

$$O_{VZ \min} = f \cdot O_{VZ \min}^S \quad (2.1.3)$$

$$O_{VZ \min} = 1,03 \cdot 9,5671$$

$$O_{VZ \min} = 9,8542 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

Hodnota součinitele f pro teplotu vzduchu 30°C a relativní vlhkost  $\phi = 70\%$  je 1,03.

**Jednotlivé složky minimálního množství vlhkých spalin**Objem CO<sub>2</sub> ve spalinách

$$O_{CO_2}^S = 0,01 \cdot (CO + CO_2 + \sum x \cdot C_x H_y + 0,03 \cdot O_{VZ\ min}^S) \quad (2.1.4)$$

$$O_{CO_2}^S = 0,01 \cdot (0 + 0,29 + 1 \cdot 97,43 + 2 \cdot 1,02 + 3 \cdot 0,315 + 4 \cdot 0,14 + 0,03 \cdot 9,5671)$$

$$O_{CO_2}^S = 1,0155 [m^3/m^3]$$

Objem dusíku ve spalinách

$$O_{N_2}^S = 0,01 \cdot (N + 78,05 \cdot O_{VZ\ min}^S) \quad (2.1.5)$$

$$O_{N_2}^S = 0,001 \cdot (0,8 + 78,05 \cdot 9,5671)$$

$$O_{N_2}^S = 7,4752 [m^3/m^3]$$

Objem Argonu ve spalinách

$$O_{Ar}^S = 0,0092 \cdot O_{VZ\ min}^S \quad (2.1.6)$$

$$O_{Ar}^S = 0,0092 \cdot 9,5671$$

$$O_{Ar}^S = 0,0880 [m^3/m^3]$$

Objem vodní páry ve spalinách

$$O_{H_2O\ min} = 0,01 \cdot \left( \sum \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + H_2 + H_2 S \right) + (f - 1) \cdot O_{VZ\ min}^S + (f' - 1) \quad (2.1.7)$$

$$O_{H_2O\ min} = 0,01 \cdot \left( \frac{4}{2} \cdot 97,43 + \frac{6}{2} \cdot 1,02 + \frac{8}{4} \cdot 0,315 + \frac{10}{4} \cdot 0,14 + 0 + 0 \right) + (1,03 - 1) \cdot 9,5671 + (1 - 1)$$

$$O_{H_2O\ min} = 2,2760 [m^3/m^3]$$

Pro suchý plyn je součinitel  $f'$  roven 1**Minimální množství suchých spalin**

$$O_{sp\ min}^S = O_{CO_2}^S + O_{N_2}^S + O_{Ar}^S \quad (2.1.8)$$

$$O_{sp\ min}^S = 8,5787 [m^3/m^3]$$

**Minimální množství vlhkých spalin**

$$O_{sp\ min}^{SV} = O_{CO_2}^S + O_{N_2}^S + O_{Ar}^S + O_{H_2O\ min} \quad (2.1.9)$$

$$O_{sp\ min}^{SV} = 10,8574 \ [m^3/m^3]$$

**2.2 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalin**

Pro plynná paliva se součinitel přebytku vzduchu  $\alpha$  pohybuje v rozmezí 1,05 až 1,1. Vyšší hodnoty součinitele přebytku vzduchu vedou k vyšším koncentracím emisí oxidů dusíku, proto volím  $\alpha = 1,08$ .

**Skutečné množství vzduchu s přebytkem**

$$O_{VZ} = \beta \cdot O_{VZ\ min} \quad (2.2.1)$$

$$O_{VZ} = 1,1 \cdot 9,8542$$

$$O_{VZ} = 10,9381 \ [m^3/kg]$$

**Skutečné množství spalin s přebytkem vzduchu**

$$O_{SP_1} = O_{sp\ min}^{SV} + (\alpha_1 - 1) \cdot O_{VZ\ min} \quad (2.2.2)$$

$$O_{SP_1} = 10,8574 + (1,08 - 1) \cdot 9,8542$$

$$O_{SP_1} = 11,6430 \ [m^3/m^3]$$

$$O_{SP_2} = O_{sp\ min}^{SV} + (\alpha_2 - 1) \cdot O_{VZ\ min} \quad (2.2.3)$$

$$O_{SP_2} = 10,8574 + (1,1 - 1) \cdot 9,8542$$

$$O_{SP_2} = 11,8401 \ [m^3/m^3]$$

$$O_{SP_3} = O_{sp\ min}^{SV} + (\alpha_3 - 1) \cdot O_{VZ\ min} \quad (2.2.4)$$

$$O_{SP_3} = 10,8574 + (1,13 - 1) \cdot 9,8542$$

$$O_{SP_3} = 12,1358 \ [m^3/m^3]$$

$$O_{SP_4} = O_{sp\ min}^{SV} + (\alpha_4 - 1) \cdot O_{VZ\ min} \quad (2.2.5)$$

$$O_{SP_4} = 10,8574 + (1,15 - 1) \cdot 9,8542$$

$$O_{SP_4} = 12,3328 \ [m^3/m^3]$$

$$O_{SP_5} = O_{sp\ min}^{SV} + (\alpha_5 - 1) \cdot O_{VZ\ min} \quad (2.2.6)$$

$$O_{SP_5} = 10,8574 + (1,25 - 1) \cdot 9,8542$$

$$O_{SP_5} = 13,3182 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

### Objemové části tříatomových plynů

$$r_{RO_2} = \frac{O_{SO_2} + O_{CO_2}}{O_{SP}} = \frac{0 + 1,0155}{10,6425} = 0,0763 \quad (2.2.7)$$

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{SP}} = \frac{2,35}{10,6425} = 0,1763 \quad (2.2.8)$$

Kde

$$O_{H_2O} = O_{H_2O\ min} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VZ\ min}^S \quad (2.2.9)$$

$$O_{H_2O} = 0 + (1,03 - 1) \cdot (1,25 - 1) \cdot 9,5671$$

$$O_{H_2O} = 2,35 \text{ [m}^3/\text{m}^3\text{]}$$

Součet objemových částí tříatomových plynů

$$r_{SP} = r_{SO_2} + r_{H_2O} = 0,0763 + 0,1763 = 0,2525 \quad (2.2.10)$$

## 2.3 Entalpie vzduchu a produktů spalování

Entalpie spalin vzniklých spálením 1 m<sup>3</sup> plynného paliva se vypočte z rovnice (2.3.1).

$$I_{sp} = I_{SP\ min} + (\alpha - 1) \cdot I_{VZ\ min} + I_P \quad (2.3.1)$$

Entalpie spalin při  $\alpha = 1$  se určí ze vztahu.

$$I_{SP\ min} = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + O_{N_2} \cdot i_{N_2} + O_{H_2O\ min} \cdot i_{H_2O} + O_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad (2.3.2)$$

Entalpie pro jednotlivé složky spalin odečteme z tabulky

Entalpie minimálního množství vzduchu ( $\alpha = 1$ ) se určí z rovnice (2.3.3.).

$$I_{VZ\ min} = O_{VZ\ min}^S \cdot (c \cdot t)_{VZ} \quad (2.3.3)$$

Kde c je měrná tepelná kapacita vzduchu při obsahu vody d = 10 g na 1 kg suchého vzduchu.

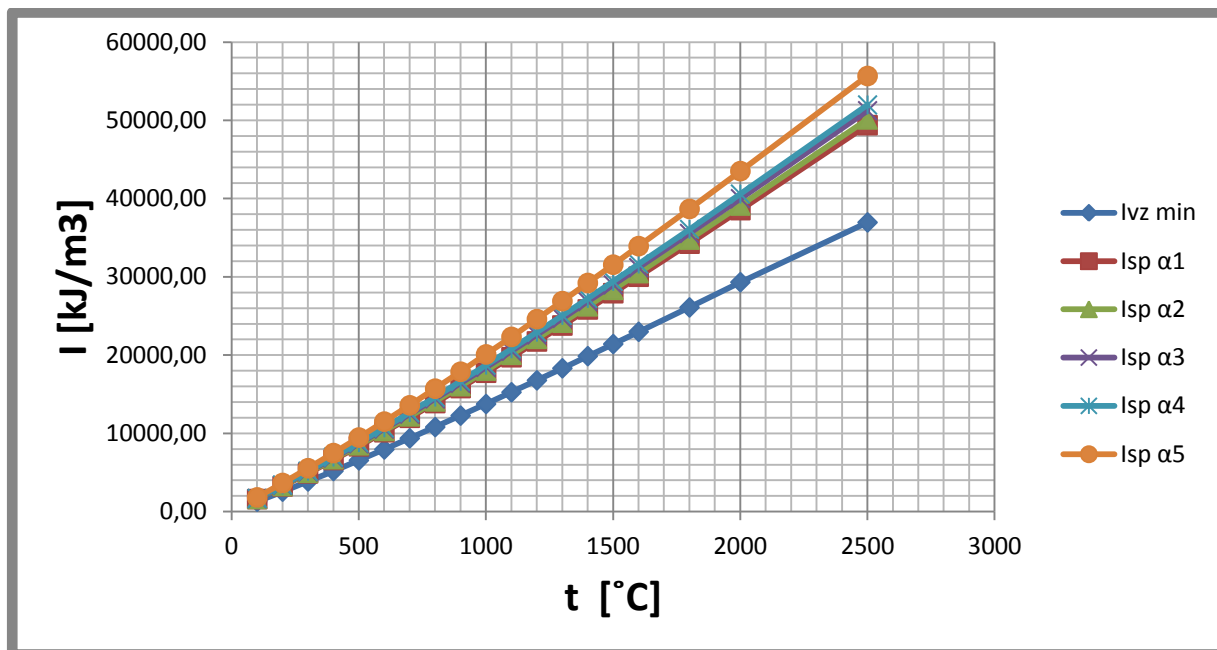


t [°C]	CO <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	SO <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	N <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> O [kJ/m <sup>3</sup> ]	Ar [kJ/m <sup>3</sup> ]	O <sub>2</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	c vzduchu [kJ/m <sup>3</sup> K]
100	170,00	191,20	129,50	150,60	93,07	131,70	1,32
200	357,50	394,10	259,90	304,50	186,00	267,00	1,33
300	558,80	610,40	392,10	462,80	278,80	406,80	1,34
400	771,90	836,50	526,70	625,90	371,70	550,90	1,35
500	994,40	1070,00	664,00	794,50	464,70	698,70	1,37
600	1225,00	1310,00	804,30	968,80	557,30	849,90	1,38
700	1462,00	1554,00	947,30	1149,00	650,20	1003,00	1,40
800	1705,00	1801,00	1093,00	1335,00	743,10	1159,00	1,41
900	1952,00	2052,00	1241,00	1526,00	835,70	1318,00	1,42
1000	2203,00	2304,00	1392,00	1723,00	928,20	1477,00	1,44
1100	2458,00	2540,00	1544,00	1925,00	1020,00	1638,00	1,45
1200	2716,00	2803,00	1698,00	2132,00	1114,00	1802,00	1,46
1300	2976,00	3063,00	1853,00	2344,00	1207,00	1965,00	1,47
1400	3239,00	3323,00	2009,00	2559,00	1300,00	2129,00	1,48
1500	3503,00	3587,00	2166,00	2779,00	1393,00	2293,00	1,49
1600	3769,00	3838,00	2325,00	3002,00	1577,00	2465,00	1,50
1800	4305,00	4363,00	2643,00	3458,00	1742,00	2804,00	1,52
2000	4844,00	4890,00	2965,00	3925,00	1857,00	3138,00	1,53
2500	6204,00	6205,00	3778,00	5132,00	2321,00	4006,00	1,55

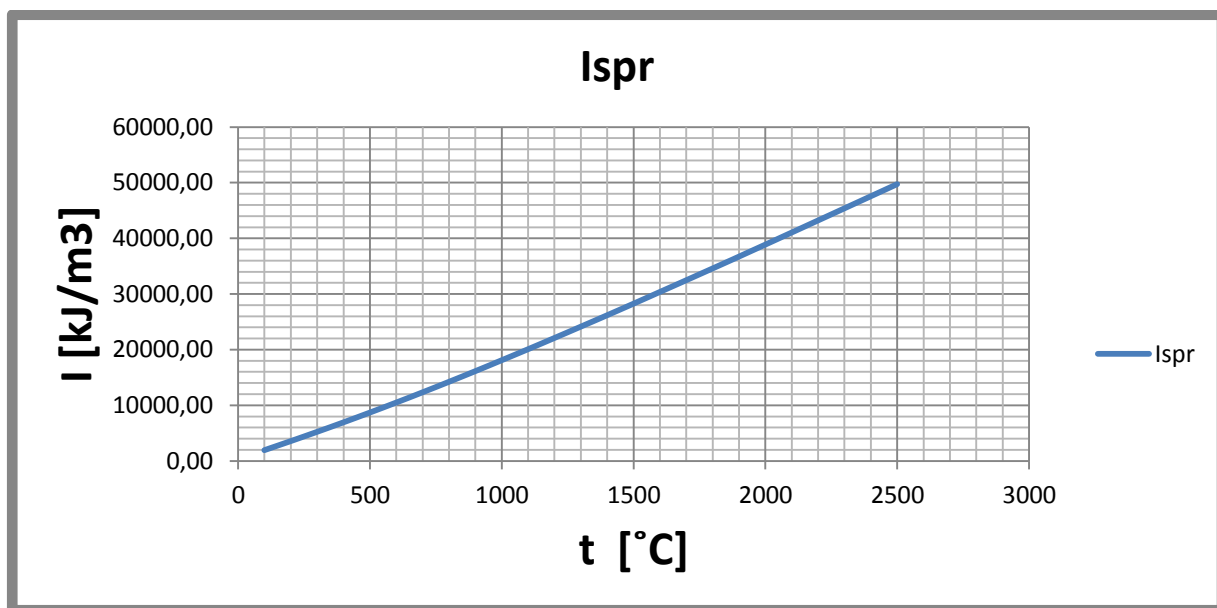
Tab. 2-2 Entalpie složek spalin

t [°C]	Isp min [kJ/m <sup>3</sup> ]	Ivz min [kJ/m <sup>3</sup> ]	Isp α1 [kJ/m <sup>3</sup> ]	Isp α2 [kJ/m <sup>3</sup> ]	Isp α3 [kJ/m <sup>3</sup> ]	Isp α4 [kJ/m <sup>3</sup> ]	Isp α5 [kJ/m <sup>3</sup> ]	Ispr [kJ/m <sup>3</sup> ]
100	1491,63	1266,69	1592,97	1618,30	1656,30	1681,63	1808,30	1947,18
200	3015,26	2546,77	3219,00	3269,94	3346,34	3397,27	3651,95	3573,21
300	4576,36	3851,73	4884,50	4961,53	5077,08	5154,12	5539,29	5238,71
400	6178,32	5181,56	6592,84	6696,47	6851,92	6955,55	7473,71	6947,05
500	7822,53	6543,93	8346,05	8476,92	8673,24	8804,12	9458,51	8700,26
600	9510,33	7938,82	10145,44	10304,22	10542,38	10701,16	11495,04	10499,65
700	11238,27	9362,41	11987,27	12174,51	12455,39	12642,64	13578,88	12341,48
800	13005,69	10799,39	13869,64	14085,63	14409,61	14625,60	15705,54	14223,85
900	14805,72	12261,25	15786,62	16031,84	16399,68	16644,90	17871,03	16140,83
1000	16645,88	13747,98	17745,72	18020,68	18433,12	18708,07	20082,87	18099,93
1100	18508,89	15249,07	19728,82	20033,80	20491,27	20796,25	22321,16	20083,03
1200	20401,48	16773,11	21743,33	22078,79	22581,99	22917,45	24594,76	22097,54
1300	22314,87	18307,68	23779,48	24145,63	24694,86	25061,02	26891,79	24133,69
1400	24245,60	19863,30	25834,66	26231,93	26827,83	27225,10	29211,43	26188,87
1500	26196,21	21411,27	27909,11	28337,33	28979,67	29407,90	31549,02	28263,32
1600	28178,63	22976,45	30016,75	30476,27	31165,57	31625,10	33922,74	30370,96
1800	32152,43	26089,60	34239,60	34761,39	35544,08	36065,87	38674,83	34593,81
2000	36179,82	29313,73	38524,92	39111,19	39990,60	40576,88	43508,25	38879,13
2500	46426,22	36953,09	49382,46	50121,53	51230,12	51969,18	55664,49	49736,67

Tab. 2-3 I-t tabulka vzduchu a produktů spalování



Obr. 1 I-t diagram spalin



Obr. 2 I-t diagram spalin na recirkulaci

## 2.4 Entalpie spalin při recirkulaci

Recirkulace spalin ve výpočtech objemů a entalpií se uvažuje na celém úseku od místa zavedení recirkulujících spalin až do místa jejich odběru.

### Koeficient recirkulace

Koeficient recirkulace spalin byl po konzultaci s vedoucím práce volen  $r = 15$ . Objem recirkulovaných spalin se vypočítá z následující rovnice.

$$r = \frac{O_r}{O_{SP\ od}} \Rightarrow O_r = r \cdot O_{SP\ od} = 0,15 \cdot 13,3182 = 1,9977 [m^3/m^3] \quad (2.4.1)$$

Kde  $O_r$  je objem spalin na  $1m^3$  paliva odebíraných na recirkulaci a  $O_{SP\ od}$  je objem spalin v místě odběru bez vlivu na recirkulaci.

**Objemy spalin v jednotlivých bodech traktu od místa zavedení spalin až do místa jejich odběru.**

$$O_{SP\ r} = O_{SP} + r \cdot O_{SP\ od} [m^3/m^3] \quad (2.4.2)$$

Kde  $O_{SP}$  je objem spalin v daném bodě bez vlivu recirkulace

$$O_{SP\ r1} = O_{SP1} + r \cdot O_{SP\ od} = 11,6430 + 0,15 \cdot 13,3182 = 13,6408 [m^3/m^3]$$

$$O_{SP\ r2} = O_{SP2} + r \cdot O_{SP\ od} = 11,8401 + 0,15 \cdot 13,3182 = 13,8379 [m^3/m^3]$$

$$O_{SP\ r3} = O_{SP3} + r \cdot O_{SP\ od} = 12,1358 + 0,15 \cdot 13,3182 = 14,1335 [m^3/m^3]$$

$$O_{SP\ r4} = O_{SP4} + r \cdot O_{SP\ od} = 12,3328 + 0,15 \cdot 13,3182 = 14,3306 [m^3/m^3]$$

$$O_{SP\ r5} = O_{SP5} + r \cdot O_{SP\ od} = 13,3182 + 0,15 \cdot 13,3182 = 15,3160 [m^3/m^3]$$

**Entalpie spalin v místě jejich zavedení do traktu po smíšení**

$$I_{SP\ r} = I_{SP} + r \cdot I_{SP\ od} \quad (2.4.3)$$

$$I_{SP\ od}^{t=128,087^\circ C} = 2330,087 [KJ/m^3]$$

Entalpie spalin  $I_{SP}$  pro přebytek  $\alpha_1 = 1,08$

Výsledné hodnoty entalpií spalin v místě jejich zavedení do traktu po smíšení pro jednotlivé teploty jsou uvedeny v tabulce 2-3.

### 3 Tepelná Bilance kotle

#### 3.1 Teplo přivedené do kotle

Teplo přivedené do kotle na  $1\text{m}^3$  paliva.

$$Q_P^P = Q_i^r + i_p + Q_{vz\ v} + Q_{pr} = 35,99 + 0 + 0 + 0 = 35,99[\text{MJ}/\text{m}^3] \quad (3.1.1)$$

Palivo není předehříváno cizím zdrojem a neobsahuje vodu, proto je fyzické teplo rovně nule.

Vzduch přiváděný do spalovací komory není předehříván žádným vnějším zdrojem. Teplota spalovacího vzduchu je před vstupem do ohříváku vzduchu rovna  $25^\circ\text{C}$ .

#### 3.2 Ztráty kotle a tepelná účinnost

Pro postup určení ztrát dle normy ČSN 07 0305 se uvažují následující ztráty:

Ztráta mechanickým nedopalem  $Z_c$

Ztráta chemickým nedopalem  $Z_{co}$

Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí  $Z_{so}$

Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků  $Z_f$

Ztráta citelným teplem spalín (komínová)  $Z_k$

V našem případě je palivem zemní plyn, proto neuvažujeme ztráty mechanickým nedopalem a fyzickým teplem tuhých zbytků.

##### 3.2.1 Ztráta chemickým nedopalem

Je vyjádřena teplem ztraceným v důsledku nespálení veškerého paliva. Je určena na základě koncentrace nespálených plynů ve spalínách.

$$Z_{co} = \frac{0,2116 \cdot mgCO \cdot O_{SP\ min}^S}{(21 - O_{2\ ref}) \cdot Q_P^P} = \frac{0,2116 \cdot 15 \cdot 8,5787}{(21 - 3) \cdot 35990,0} = 4,2031 \cdot 10^{-5} [-] \quad (3.2.1)$$

##### 3.2.2 Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Vyjadřuje množství tepla uniklé pláštěm do okolí. Závisí na velikosti kotle, kvalitě izolace stěn, způsobu oplechování a výkonu kotle.

Po odečtení z grafu (skripta Tomáš Dlouhý str. 66)

$$Z_{so} = 0,0065 [-] \quad \text{hliníkový nátěr oplechování}$$

### 3.2.3 Ztráta citelným teplem spalin

Vyjadřuje množství tepla uniklé z kotle spalinami. Jedná se o největší ztrátu. Závisí na teplotě spalin a součinitele přebytku vzduchu za kotlem.

$$Z_k = (1 - Z_c) \cdot \frac{I_{SP} - I_{VZ}}{Q_P^P} = (1 - 0) \cdot \frac{2361,3977 - 302,2021}{35990,0} = 0,0572 [-] \quad (3.2.2)$$

Entalpie vzduchu s přebytkem vzduchu za kotlem

$$I_{VZ} = \alpha_k \cdot I_{VZ \min} = 1,25 \cdot 241,7617 = 302,2021 [kJ/m^3] \quad (3.2.3)$$

Entalpie minimální množství vzduchu

$$I_{VZ \min} = O_{VZ \min}^S \cdot (c \cdot t)_{VZ} = 9,5671 \cdot 1,0108 \cdot 25 = 241,7617 [kJ/m^3] \quad (3.2.4)$$

### 3.2.4 Tepelná účinnost kotle

$$\eta_k = 100 - \sum Z = 100 - [(4,2031 \cdot 10^{-5} + 0,0065 + 0,0572) \cdot 100] \quad (3.2.5)$$

$$\eta_k = 93,711 [\%]$$

## 3.3 Výrobní teplo páry a množství paliva

V kotli se neodebírání sytá pára, rovněž v kotli není mezipřehřívák páry. Vzhledem k tomu, že napájecí voda splňuje požadavky ČSN EN 12952, množství odluhu je zanedbatelné (menší nežli 0,5%)

$$Q_V = M_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + M_{mp} \cdot (i_2 - i_1) + M_o \cdot (i' - i_{nv}) + M_{op} \cdot (i'' - i_{nv}) \quad (3.3.1)$$

$$Q_V = 34,72 \cdot (3482,905 - 680,74) + 0 + 0 + 0 = 97,291 [MW]$$

### 3.4 Množství paliva

Skutečné množství spáleného paliva odpovídá množství paliva přivedeného do kotle, protože nevzniká ztráta mechanickým nedopalem jako u tuhých paliv.

$$M_P = \frac{Q_V}{Q_P^P \cdot \frac{\eta_k}{100}} = \frac{97,2912}{35990,0 \cdot \frac{93,6242}{100}} = 2,885 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (3.4.1)$$

### 3.5 Tlaky média v jednotlivých výhřevných plochách

Tlak odebírané páry	9,4 MPa
Ztráta ve výstupním přehříváku	3,5 MPa
Ztráta výstupních šotech DP	2,5 MPa
Ztráta ve vstupních šotech DP	2,5 MPa
Ztráta v přehříváku P5	2 MPa
Ztráta v přehříváku P4	3 MPa
Ztráta v bubnu a výparníku	1 MPa
Ztráta v Ekonomizéru	2 MPa
<hr/>	
Celková tlaková ztráta	110,5 MPa

## 4 Výpočet Spalovací komory

Rozměry spalovací komory jsou určeny výkresem kotle

### Objemové zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{2,8874 \cdot 35990,0}{690,07} = 150,450 [KW/m^3] \quad (4.1.1)$$

### Horní část ohniště

$$V_{h.č.} = 0,985 \cdot 5,743 \cdot 6,602 + \frac{0,985 \cdot 1,819}{2} \cdot 6,602 = 43,261 [m^3] \quad (4.1.2)$$

### Střed ohniště

$$V_{st} = 7,562 \cdot 11,558 \cdot 6,602 = 577,025 [m^3] \quad (4.1.3)$$

### Dno ohniště

$$V_{dno} = \frac{1,361 \cdot 1,761}{2} \cdot 7,562 + 7,562 \cdot 1,761 \cdot 3,879 = 69,779 [m^3] \quad (4.1.4)$$

### Objem ohniště $V_o$

$$V_o = V_{h.č.} + V_{st} + V_{dno} = 43,261 + 577,025 + 69,779 = 690,066 [m^3] \quad (4.1.5)$$

### Průřezové zatížení ohniště

$$q_f = \frac{M_p \cdot Q_i^r}{f} = \frac{2,885 \cdot 35,99}{7,562 \cdot 6,602} = 2,079 [MW/m^2] \quad (4.1.6)$$

### Účinná sálavá plocha ohniště

$$F_{ús} = \sum F_i \cdot x_i [m^2] \quad (4.1.7)$$

$$F_{ús} = 1 \cdot [F_{S1} + F_{S2} + F_{S3} + F_{S4} + 2 \cdot (F_{S5} + F_{S6} + F_{S7})] + 0 \cdot F_{S8} - F_{hoř} - F_{otvory}$$

$$F_{ús} = 444,213 [m^2]$$

$$F_{S1} = 6,602 \cdot 2,068 = 13,653 [m^2]$$

$$F_{S2} = 5,743 \cdot 6,602 = 37,915 [m^2]$$

$$F_{S3} = 6,602 \cdot 11,558 = 76,306 [m^2]$$

$$F_{S4} = 12,543 \cdot 6,602 = 82,809 [m^2]$$

$$F_{S5} = (0,985 \cdot 5,743) + \left( \frac{0,985 \cdot 1,819}{2} \right) + (11,558 \cdot 7,562) = 93,954 [m^2]$$

$$F_{S6} = \left( \frac{1,361 \cdot 1,761}{2} \cdot 2 \right) + (3,879 \cdot 1,761) = 9,228 [m^2]$$

$$F_{S7} = 2,226 \cdot 7,562 = 16,833 [m^2]$$

$$F_{S8} = 7,562 \cdot 3,879 = 29,333 [m^2]$$

$$F_{hoř.} = 4,5 [m^2]$$

$$F_{otvory} = 2,0 [m^2]$$

### Celkový povrch stěn ohniště

$$F_{st} = F_{S1} + F_{S2} + F_{S3} + F_{S4} + 2 \cdot (F_{S5} + F_{S6} + F_{S7}) + F_{S8} [m^2] \quad (4.1.8)$$

$$F_{st} = 480,046 [m^2]$$

## 4.1 Tepelný výpočet ohniště

### 4.1.1 Součinitel M

Jedná se o součinitel, který závisí na poloze maximální teploty plamene a druhu spalovaného paliva.

$$M = 0,52 - 0,3 \cdot x_o = 0,52 - 0,3 \cdot 0,533 = 0,329 \quad (4.1.1)$$

Pro prášková ohniště s horizontálním uspořádáním hořáků a vertikálním prouděním spalin se hodnota  $x_o$  určí z poměrné výšky hořáků.

$$x_o = x_h$$

$$x_h = \frac{h_h}{h_c} = \frac{9,125}{14,304} = 0,638$$



### 4.1.2 Boltzmanovo číslo

$$B_o = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot \overline{O_{SP} \cdot c}}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot \overline{\psi} \cdot F_{st} \cdot T_a^3} \quad (4.1.2)$$

$$B_o = \frac{0,993 \cdot 2,885 \cdot 21,001}{5,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,65 \cdot 444,213 \cdot (1989,037 + 273,15)^3}$$

$$B_o = 0,292$$

### 4.1.3 Teplota spalin na výstupu z ohniště

$$\vartheta_0 = \frac{\vartheta_a + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{B_o}\right)^{0,6}} - 273,15 = \frac{1989,037 + 273,15}{1 + 0,329 \cdot \left(\frac{0,565}{0,292}\right)^{0,6}} - 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.1.3)$$

$$\vartheta_0 = 1247,341 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{Z_{SO}}{\eta_k + Z_{SO}} = 1 - \frac{0,65}{93,686 + 0,65} = 0,993 \quad (4.1.4)$$

### Střední celkové měrné teplo spalin

$$\overline{O_{SP} \cdot c} = \frac{I_u - I_0}{\vartheta_a - \vartheta_0} = \frac{38290,02 - 22712,88}{1989,037 - 1247,617} = 21,001 \text{ [KJ/m}^3\text{K]} \quad (4.1.5)$$

### Užitečné teplo uvolněné v ohništi

$$I_u = Q_p^v \cdot \frac{100 - Z_{CO} - Z_C - Z_{fs}}{100 - Z_C} + Q_{VZ} - Q_{VZV} + r \cdot I_{SP\ od} \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (4.1.6)$$

$$I_u = 35990,0 \cdot \frac{100 - 0,00416 - 0 - 0}{100 - 0} + 1947,321 - 0 + (0,15 \cdot 2361,4) = 38290,02 \text{ [KJ/m}^3\text{]}$$

$$Q_{VZ} = (\alpha_o - \Delta\alpha_o - \Delta\alpha_{ml}) \cdot I''_{VZ\ min} + (\Delta\alpha_o + \Delta\alpha_{ml}) \cdot I'_{VZ\ min} \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (4.1.7)$$

$$Q_{VZ} = (1,08 - 0,02 - 0) \cdot 1829,925 + (0,02 + 0) \cdot 380,007 = 1947,321 \text{ [KJ/m}^3\text{]}$$

**Součinitel tepelné efektivity stěn**

Součinitel zanešení stěn  $\xi$  je pro plyn 0,65

$$\psi = x \cdot \xi = 1 \cdot 0,65 = 0,65 \quad (4.1.8)$$

**4.1.4 Stupeň černosti ohniště**

$$a_0 = \frac{a_{pl}}{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \overline{\psi}} = \frac{0,457}{0,457 + (1 - 0,457) \cdot 0,65} = 0,565 \quad (4.1.9)$$

**Efektivní stupeň černosti plamene**

$$a_{pl} = m \cdot a_{sv} + (1 - m) \cdot a_{ns} = 0,1 \cdot 0,7425 + (1 - 0,1) \cdot 0,4508 = 0,457 \quad (4.1.10)$$

$m$  - součinitel charakterizující podíl objemu ohniště zaplněného svítivou částí plamene.

**Tepelné zatížení ohniště:**

$$\frac{M_p \cdot Q_i^r}{V_o} = \frac{2,885 \cdot 35,99 \cdot 10^3}{690,066} = 150,59 [KW/m^3] \quad (4.1.11)$$

$$150,59 < 400 \Rightarrow m = 0,1$$

Stupeň černosti nesvítivé části plamene

$$a_{ns} = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-1,1582 \cdot 0,1 \cdot 5,175} = 0,425 \quad (4.1.12)$$

**4.1.5 Součinitel zeslabení sálání nesvítivými tříatomovými plyny**

$$K = K_{SP} \cdot r_{SP} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{SP} \cdot S}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T_0}{1000} \right) \cdot r_{SP} \quad (4.1.13)$$

$$K = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,1975}{3,16 \cdot \sqrt{0,0253 \cdot 5,175}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1247,341 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2847$$

$$K = 1,070 [1/m \cdot Mpa]$$

**Celkový parciální tlak**

$$p_{SP} = p \cdot r_{SP} = 0,1 \cdot 0,2525 = 0,0253 \text{ [MPa]} \quad (4.1.14)$$

**Účinná tloušťka sálavé vrstvy**

$$S = 3,6 \cdot \frac{V_o}{F_{st}} = 3,6 \cdot \frac{690,066}{480,046} = 5,175 \text{ [m]} \quad (4.1.15)$$

**Stupeň černosti svítivé části plamene**

$$a_{sv} = 1 - e^{-kps} = 1 - e^{-1,266 \cdot 0,1 \cdot 5,175} = 0,748 \quad (4.1.16)$$

**Součinitel zeslabení sálání svítivé části plamene**

$$K = K_{SP} \cdot r_{SP} + K_C = 0,3 \cdot (2 - \alpha_1) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{T_0}{1000} - 0,5\right) \cdot \frac{C^r}{H^r} \quad (4.1.17)$$

$$K = 0,3 \cdot (2 - 1,08) \cdot \left(1,6 \cdot \frac{1247,341 + 273,15}{1000}\right) \cdot 2,985 = 2,662 \text{ [1/m} \cdot \text{Mpa]}$$

**Podíl obsahu uhlíku a vodíku v původním vzorku paliva**

$$\frac{C^r}{H^r} = 0,12 \cdot \sum \frac{m}{n} \cdot C_m \cdot H_n = 0,12 \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot 97,43 + \frac{2}{6} \cdot 1,02 + \frac{3}{8} \cdot 0,315 + \frac{4}{10} \cdot 0,14\right) \quad (4.1.18)$$

$$\frac{C^r}{H^r} = 2,985$$

**4.1.6 Množství tepla odevzdané v ohništi do stěn**

$$Q_s = \varphi \cdot (I_u - I_o) = 0,993 \cdot (38368,66 - 21841,37) = 15469,833 \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (4.1.19)$$

**4.1.7 Střední tepelné zatížení stěn ohniště**

$$\bar{q} = \frac{\varphi \cdot M_{PV} \cdot (I_u - I_o)}{F_{\dot{u}s}} = \frac{0,993 \cdot 2,885 \cdot (38290,02 - 22712,88)}{444,213} \quad (4.1.20)$$

$$\bar{q} = 100,460 [KW/m^2]$$

## 5 Oblast deskového ohříváku

### 5.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (21841,37 - 15703,61) = 6095,476 \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (5.1.1)$$

**Střední teplota proudu spalín:**

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{1247,341 + 861,65}{2} = 1054,496 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.1.2)$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu spalín 1054,496 [°C]:**

$$\lambda = 0,119 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel kinematické viskozity  $\nu$  pro střední teplotu spalín 1054,496 [°C]:**

$$\nu = 0,000191 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu spalín 1054,496 [°C]:**

$$Pr = 0,592 \text{ [-]}$$

**Rozměry vstupního průřezu do oblasti DP**

$$a_{vstup} = 5,162 \text{ [m]}$$

$$b_{vstup} = 6,602 \text{ [m]}$$

**Rozměry výstupního průřezu z oblasti DP**

$$a_{výstup} = 6,602 \text{ [m]}$$

$$b_{výstup} = 6,020 \text{ [m]}$$

**Rychlost proudu spalín**

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \left( 1 + \frac{\vartheta}{273,15} \right) = \frac{2,885 \cdot 13,64}{35,26} \cdot \left( 1 + \frac{1054,496}{273,15} \right) = 5,424 \text{ [m/s]} \quad (5.1.3)$$

**Světlý průřez proudu spalín**

$$F_{sp} = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 32,763 \cdot 38,169}{32,763 + 38,169} = 35,26 \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.1.4)$$

**Vstupní průřez do oblasti DP**

$$F_1 = 5,162 \cdot 6,602 - (7 \cdot 4,945 \cdot 0,038) = 32,763 [m^2] \quad (5.1.5)$$

**Výstupní průřez z oblasti DP**

$$F_2 = 6,602 \cdot 6,020 - (7 \cdot 5,920 \cdot 0,038) = 38,169 [m^2] \quad (5.1.6)$$

**5.2 Výstupní (krajní) deskový přehřívák**

Výstupní šoty deskového přehříváku			
počet trubek	$n_{tr}$	19	[–]
počet desek	$z$	4	[–]
příčná rozteč	$s_1$	0,825	[m]
Podélná rozteč	$s_2$	0,042	[m]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,028	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,005	[m]

**5.2.1 Součinitel prostupu tepla:**

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{80,978} + \frac{1}{2803,861}} = 67,100 [W/m^2 K] \quad (5.2.1)$$

**Součinitel tepelné efektivity**

$$\psi = 0,85 [W/m^2 K]$$

**Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění**

$$\alpha_1 = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,85 \cdot (30,531 + 64,853) = 81,077 [W/m^2 K] \quad (5.2.2)$$

Součinitel omývání desek  $\omega$  pro příčné proudění spalin a pro daný typ deskového přehříváku je roven 0,85.

**Součinitel přestupu tepla konvekcí**

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W/m^2 K] \quad (5.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 1 \cdot 0,621 \cdot \frac{0,119}{0,038} \cdot \left( \frac{5,424 \cdot 0,038}{0,000191} \right)^{0,65} \cdot 0,592^{0,33} = 30,531 [W/m^2 K]$$

**Oprava na počet podélných řad  $c_z$** 

$$z_f > 10 \Rightarrow c_z = 1$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči  $\sigma_1$  a poměrné podélné rozteči  $\sigma_2$

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[ 1 + (2 \cdot 3 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{1,105}{2} \right)^3 \right]^{-2} \quad (5.2.4)$$

$$c_s = 0,621$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = 21,711$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = 1,105$$

Při  $\sigma_2 < 2$  a  $\sigma_1 > 3$  do vzorce se dosazuje  $\sigma_1 = 3$ .

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2 K] \quad (5.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,275 \cdot (1054,496 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{458 + 273,15}{1054,496 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{458 + 273,15}{1054,496 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 64,853 [W/m^2 K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

**Stupeň černosti proudy spalin**

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,316} = 0,275 \quad (5.2.6)$$

**Optická hustota spalin**

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (9,891 \cdot 0,285 + 0) \cdot 0,1 \cdot 1,159 = 0,322 \quad (5.2.7)$$

**Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny**

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \cdot [1/m \cdot MPa] \quad (5.2.8)$$

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,197}{3,16 \cdot \sqrt{0,025 \cdot 1,143}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{1054,496 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_{sp} = 9,879 [1/m \cdot MPa]$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = \frac{1,8}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{1}{c}} = \frac{1,8}{\frac{1}{6,203} + \frac{1}{0,825} + \frac{1}{4,945}} = 1,143 [m] \quad (5.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{stm} + \Delta t = 458 [^\circ C] \quad (5.2.10)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 [^\circ C]$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{stm} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{406 + 460}{2} = 433 [^\circ C]$$

$$t_1 = 406 [^\circ C]$$

$$t_2 = 460 [^\circ C]$$



Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st\ m} = \frac{9,75 + 10,0}{2} = 9,875 \text{ [MPa]}$$

$$p_1 = 9,75 \text{ [MPa]}$$

$$p_2 = 10,0 \text{ [MPa]}$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 433 [°C] s střední tlak média 9,875 [MPa]**

$$\lambda = 0,071 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 433 [°C] s střední tlak média 9,875 [MPa]**

$$\eta = 26,772 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu média 433 [°C] s střední tlak média 9,875 [MPa]**

$$Pr = 1,078 \text{ [-]}$$

**Měrný objem pro střední teplotu média 433 [°C] s střední tlak média 9,875 [MPa]**

$$v = 0,0291 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{v} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (5.2.10)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,071}{0,028} \cdot \left( \frac{20,736 \cdot 0,028}{26,772 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0291} \right)^{0,8} \cdot 1,078^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2997,273 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{33,33}{0,0468} \cdot 0,0291 = 20,736 \text{ [m/s]}$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,028^2}{4} \cdot 19 \cdot 4 = 0,0468 \text{ [m}^2\text{]}$$

**Množství páry v deskovém přehříváku**

$$M_{pp} = 33,33 \text{ [kg/s]}$$

### 5.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{841,341 - 401,65}{\ln\left(\frac{841,341}{401,65}\right)} = 594,646 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.2.11)$$

$$\Delta t_v = 1247,341 - 406 = 841,341 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = 861,65 - 460 = 401,65 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Výhřevná plocha

$$S = z \cdot S_1 \cdot x = 4 \cdot 35,644 \cdot 0,95 = 135,448 \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.2.12)$$

Úhlový součinitel desek pro poměrnou podélnou rozteč

$$x = 0,095$$

Plocha jedné desky

$$S_1 = 2 \cdot a \cdot (c + D) = 2 \cdot 22,446 \cdot (0,756 + 0,038) = 35,644 \text{ [m}^2\text{]} \quad (5.2.13)$$

Střední výška (délka) desky ve směru proudění páry

$$a = 22,446 \text{ [m]}$$

Hloubka desky ve směru proudění spalin

$$c = 0,756 \text{ [m]}$$

### 5.2.3 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{DPvystup} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{67,100 \cdot 594,646 \cdot 135,448}{2,885} \cdot 10^{-3} \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (5.2.12)$$

$$Q_k^{DPvystup} = 1873,506 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

### 5.3 Vstupní (středový) deskový přehřívák

Vstupní šoty deskového přehříváku			
počet trubek	$n_{tr}$	22	[—]
počet desek	$z$	3	[—]
příčná rozteč	$s_1$	0,825	[m]
Podélná rozteč	$s_2$	0,042	[m]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,030	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,004	[m]

#### 5.3.1 Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{78,461} + \frac{1}{3217,069}} = 65,104 [W/m^2K] \quad (5.3.1)$$

Součinitel tepelné efektivnosti:

$$\psi = 0,85 [W/m^2K]$$

**Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění**

$$\alpha_1 = \omega \cdot (\alpha_k + \alpha_s) = 0,85 \cdot (30,531 + 61,775) = 78,461 [W/m^2K] \quad (5.3.2)$$

Součinitel omývání desek  $\omega$  pro příčné proudění spalin a pro daný typ deskového přehříváku je roven 0,85.

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$\alpha_k$  je stejný jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.3)

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2K] \quad (5.3.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,275 \cdot (1054,496 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{410,5 + 273,15}{1054,496 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{410,5 + 273,15}{1054,496 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 61,775 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$a$  je stejný jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.6)

Optická hustota spalin

$k \cdot p \cdot s$  je stejná jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.7)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$k_{sp}$  je stejný jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.8)

Teplota vnějšího povrchu nánosu na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 410,5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.3.4)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{st\ m} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{365 + 406}{2} = 385,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_1 = 365 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_2 = 406 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st} = \frac{10,0 + 10,25}{2} = 10,125 \text{ [MPa]}$$

$$p_1 = 10,0 \text{ [MPa]}$$

$$p_2 = 10,25 \text{ [MPa]}$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 385,5 [°C] a střední tlak média 10,125 [MPa]**

$$\lambda = 0,070 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 385,5 [°C] a střední tlak média 10,125 [MPa]**

$$\eta = 25,365 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu média 385,5 [°C] a střední tlak média 10,125 [MPa]**

$$Pr = 1,231 \text{ [–]}$$

**Měrný objem  $v$  pro střední teplotu média 385,5 [°C] a střední tlak média 10,125 [MPa]**

$$v = 0,0250 [m^3/kg]$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m [W/m^2 \cdot K] \quad (5.3.4)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,070}{0,030} \cdot \left( \frac{19,582 \cdot 0,030}{25,365 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0250} \right)^{0,8} \cdot 1,231^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 3217,069 [W/m^2 \cdot K]$$

**Rychlost proudu média**

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{33,33}{0,0467} \cdot 0,0250 = 17,870 [m/s]$$

**Průřez pro páru**

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,030^2}{4} \cdot 22 \cdot 3 = 0,0467 [m^2]$$

**Množství páry v deskovém přehříváku**

$$M_{pp} = 33,33 [kg/s]$$

### 5.3.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{882,341 - 455,65}{\ln \left( \frac{882,341}{455,65} \right)} = 645,667 [°C]$$

$$\Delta t_v = 1247,341 - 365 = 882,341 [°C]$$

$$\Delta t_m = 861,65 - 406 = 455,65 [°C]$$

**Výhřevná plocha**

Je stejná jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.12)

### 5.3.3 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{DPvstup} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{65,104 \cdot 645,667 \cdot 135,448}{2,885} \cdot 10^{-3} [kJ/m^3] \quad (5.3.4)$$

$$Q_k^{DPvstup} = 1973,731 [kJ/m^3]$$

### 5.4 Výparník v oblasti deskového přehříváku

Stěny výparníku v oblasti deskového přehříváku			
celkový počet trubek	$n_{tr}$	292	[–]
počet trubek boční stěny	$n_{tr1}$	64	[–]
počet trubek přední stěny	$n_{tr2}$	82	[–]
počet trubek zadní stěny	$n_{tr3}$	31	[–]
příčná rozteč	$s_1$	0,08	[m]
vnější průměr trubky	$D$	0,0603	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0503	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,005	[m]
délka trubek bočních stěn	$L_1$	6,970	[m]
délka trubek přední stěny	$L_2$	7,890	[m]
délka trubek zadní stěny	$L_3$	0,950	[m]

#### 5.4.1 Součinitel prostupu tepla:

$$k = \Psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 65,644 = 55,891 [W/m^2K] \quad (5.4.1)$$

#### Součinitel tepelné efektivnosti

$$\Psi = 0,85 [W/m^2K]$$

#### Součinitel přestupu tepla na straně spalín pro podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 7,960 + 57,794 = 65,754 [W/m^2K] \quad (5.4.2)$$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m [W/m^2 \cdot K] \quad (5.4.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,118}{1,074} \cdot \left( \frac{5,424 \cdot 1,074}{0,000191} \right)^{0,8} \cdot 0,592^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 7,960 [W/m^2 \cdot K]$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 31,360}{116,812} = 1,074 \text{ [m]} \quad (5.4.4)$$

Světlý průřez kanálu

$$F = (5,162 \cdot 6,602) - 2 \cdot [(0,0603 + 0,0197) \cdot 81 + 0,0603] \cdot 0,0603 - \quad (5.4.5)$$

$$2 \cdot [(0,0603 + 0,0197) \cdot 63 + 0,0603] \cdot 0,0603 - (7 \cdot 4,945 \cdot 0,038)$$

$$F = 34,080 - (2 \cdot 0,394) - (2 \cdot 0,308) - 1,315 = 31,360 \text{ [m}^2\text{]}$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot (5,162 + 6,602) + [(0,0603 + 0,0197) \cdot 81 + 2 \cdot 0,0603] \cdot 2 + \quad (5.4.6)$$

$$[(0,0603 + 0,0197) \cdot 63 + 2 \cdot 0,0603] \cdot 2 + [(4,945 + 0,038) \cdot 2] \cdot 7$$

$$O = 23,528 + 13,201 + 10,321 + 69,762 = 116,812 \text{ [m]}$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (5.4.7)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,275 \cdot (1054,496 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{345 + 273,15}{1054,496 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{345 + 273,15}{1054,496 + 273,15}\right)}$$

$$\alpha_s = 57,794 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$a$  je stejný jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.6)

Optická hustota spalin

$k \cdot p \cdot s$  je stejná jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.7)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$k_{sp}$  je stejný jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.8)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 320 + \Delta t = 345 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.4.8)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Teplota média v trubkách výparníku je stejná na vstupu i výstupu.

$$t_{st\ m} = 320 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

#### 5.4.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{927,341 - 541,65}{\ln\left(\frac{927,341}{541,65}\right)} = 717,296 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.4.9)$$

$$\Delta t_v = 1247,341 - 320 = 927,341 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = 861,65 - 320 = 541,65 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Výhřevná plocha

$$S = \left[ (6,97 \cdot 5,16) - \left( \frac{1,5 \cdot 1,9}{2} \right) \right] \cdot 2 + (7,89 \cdot 6,602) + (0,95 \cdot 6,602) \quad (5.4.10)$$

$$S = 127,442 \text{ [m}^2\text{]}$$

#### 5.4.3 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{výp} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{55,891 \cdot 717,296 \cdot 127,442}{2,885} \cdot 10^{-3} \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (5.4.11)$$

$$Q_k^{výp} = 1771,127 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$



## 5.5 Část stropového přehříváku v oblasti deskového přehříváku

Stropový přehřívák			
počet trubek	$n_{tr}$	82	[–]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0308	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,0036	[m]
délka trubky	$l_{tr}$	3,6	[m]

### 5.5.1 Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{65,842} + \frac{1}{6071,529}} = 55,365 [W/m^2K] \quad (5.5.1)$$

Součinitel tepelné efektivity:

$$\psi = 0,85 [W/m^2K]$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro podélné proudění:

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 7,960 + 57,881 = 65,842 [W/m^2K] \quad (5.5.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$\alpha_k$  je totožný jako výparníku v oblasti deskového přehříváku (5.4.3)

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2K] \quad (5.5.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,275 \cdot (1054,341 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{346,5 + 273,15}{1054,341 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{346,5 + 273,15}{1054,341 + 273,15}\right)}$$

$$\alpha_s = 57,881 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$a$  je stejný jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.6)

Optická hustota spalin

$k \cdot p \cdot s$  je stejná jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.7)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$k_{sp}$  je stejný jako u výstupního deskového přehříváku (5.2.8)

### Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{stm} + \Delta t = 321,5 + \Delta t = 346,5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (5.5.4)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{stm} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{320 + 323}{2} = 321,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_1 = 320 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_2 = 323 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{10,75 + 10,85}{2} = 10,8 \text{ [MPa]}$$

$$p_1 = 10,75 \text{ [MPa]}$$

$$p_2 = 10,85 \text{ [MPa]}$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 321,5 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$\lambda = 0,355 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 321,5 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$\eta = 63,479 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu média 321,5 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$Pr = 1,133 \text{ [-]}$$

**Měrný objem pro střední teplotu média 321,5 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$v = 0,0170 [m^3/kg]$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m [W/m^2 \cdot K] \quad (5.5.5)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,355}{0,0308} \cdot \left( \frac{9,274 \cdot 0,0308}{63,479 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0170} \right)^{0,8} \cdot 1,133^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 6071,529 [W/m^2 \cdot K]$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{33,33}{0,0611} \cdot 0,0170 = 9,274 [m/s]$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} \cdot 82 \cdot 1 = 0,0611 [m^2]$$

Množství páry ve stropním přehříváku přehříváku

$$M_{pp} = 33,33 [kg/s]$$

### 5.5.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{927,341 - 538,65}{\ln \left( \frac{927,341}{538,65} \right)} = 715,485 [°C] \quad (5.5.6)$$

$$\Delta t_v = 1247,341 - 320 = 927,341 [°C]$$

$$\Delta t_m = 861,65 - 323 = 538,65 [°C]$$

### 5.5.3 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,4 \cdot 82 = 35,241 [m^2] \quad (5.5.7)$$

**5.5.4 Rovnice sdílení tepla**

$$Q_k^{strop} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{55,365 \cdot 715,485 \cdot 23,494}{2,885} \cdot 10^{-3} [kJ/m^3] \quad (5.5.8)$$

$$Q_k^{strop} = 483,932 [kJ/m^3]$$

**5.6 Bilance celé oblasti deskového přehříváku**

$$Q_k = Q_k^{DPvystup} + Q_k^{DPvstup} + Q_k^{výp} + Q_k^{strop} \quad (5.6.1)$$

$$Q_k = 1873,506 + 1973,731 + 1771,127 + 483,932 = 6102,295 [kJ/m^3]$$

**5.6.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla**

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_k}{Q_b} \cdot 100 = \frac{6095,476 - 6102,295}{6095,476} \cdot 100 = -0,112 [\%] \quad (5.6.2)$$

Odchylka je menší jak 2%, proto můžeme výpočet teploty plochy považovat za ukončený.

## 6 Oblast výstupního přehříváku

### 6.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (15703,61 - 12305,61) = 3374,595 \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (6.1.1)$$

Střední teplota proudu spalín:

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{861,65 + 706,86}{2} = 784,225 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.1.2)$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu spalín 784,225 [°C]:**

$$\lambda = 0,091 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel kinematické viskozity  $\nu$  pro střední teplotu spalín 784,225 [°C]:**

$$\nu = 0,000131 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu spalín 784,225 [°C]:**

$$Pr = 0,618 \text{ [-]}$$

**Rozměry vstupního průřezu do oblasti výstupního přehříváku:**

$$a_{vstup} = 6,020 \text{ [m]}$$

$$b_{vstup} = 6,602 \text{ [m]}$$

**Rozměry výstupního průřezu z výstupního přehříváku:**

$$a_{výstup} = 4,982 \text{ [m]}$$

$$b_{výstup} = 6,020 \text{ [m]}$$

Rychlost proudu spalín:

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \left( 1 + \frac{\vartheta}{273,15} \right) = \frac{2,885 \cdot 13,838}{27,842} \cdot \left( 1 + \frac{784,225}{273,15} \right) = 5,550 \text{ [m/s]} \quad (6.1.3)$$

Světlý průřez proudu spalín:

$$F_{sp} = \frac{2 \cdot F_1 \cdot F_2}{F_1 + F_2} = \frac{2 \cdot 31,683 \cdot 24,831}{31,683 + 24,831} = 27,842 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.1.4)$$

Vstupní průřez do oblasti DP:

$$F_1 = (6,602 \cdot 6,020) - [82 \cdot (0,038 + 0,0603)] = 31,683 [m^2] \quad (6.1.5)$$

Výstupní průřez z oblasti DP:

$$F_2 = (6,602 \cdot 4,982) - [82 \cdot (0,038 + 0,0603)] = 24,831 [m^2] \quad (6.1.6)$$

## 6.2 Oblast výstupního přehříváku

Výstupní přehřívák			
počet trubek	$n_{tr}$	162	[–]
počet řad	$z$	12	[–]
příčná rozteč	$s_1$	0,160	[m]
Podélná rozteč	$s_2$	0,070	[m]
vnější průměr trubky	$D$	0,032	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0208	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,0056	[m]
Délka trubky	$l_{tr}$	25,247	[m]

### 6.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{88,670} + \frac{1}{1605,059}} = 77,340 [W/m^2K] \quad (6.2.1)$$

Součinitel tepelné efektivity:

$$\psi = 0,85 [W/m^2K]$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín pro příčné proudění:

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 65,803 + 32,513 = 88,670 [W/m^2K] \quad (6.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} [W/m^2K] \quad (6.2.3)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,359 \cdot \frac{0,091}{0,032} \cdot \left( \frac{5,550 \cdot 0,032}{0,000131} \right)^{0,6} \cdot 0,618^{0,33} = 65,803 [W/m^2K]$$

Oprava na počet podélných řad  $c_z$ :

$$z \geq 10 \Rightarrow c_z = 1 \quad (6.2.4)$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči  $\sigma_1$  a poměrné podélné rozteči  $\sigma_2$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{4,211 - 1}{2,712 - 1} = 1,722 \quad (6.2.5)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 5^2 + 2,188^2} = 3,322 \quad (6.2.6)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,160}{0,032} = 5$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,070}{0,032} = 2,188$$

$$1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5 \quad \sigma_1 \geq 3$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,359 \quad (6.2.7)$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2K] \quad (6.2.8)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,193 \cdot (784,255 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{488,5 + 273,15}{784,255 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{488,5 + 273,15}{784,255 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 30,653 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalín

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,220} = 0,1975 \quad (6.2.9)$$

Optická hustota spalín

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (21,1 \cdot 0,280 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,372 = 0,220 \quad (6.2.10)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad [1/m \cdot MPa] \quad (6.2.11)$$

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,195}{3,16 \cdot \sqrt{0,025 \cdot 0,372}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{784,255 + 273,15}{1000} \right) = 21,1 \quad [1/m \cdot MPa]$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,032 \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,16 \cdot 0,07}{0,032^2} - 1 \right) = 0,372 \quad [m] \quad (6.2.12)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 513,5 \quad [^\circ C] \quad (6.2.13)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \quad [^\circ C]$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{st\ m} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{437 + 540}{2} = 488,5 \quad [^\circ C]$$

$$t_1 = 437 \quad [^\circ C]$$

$$t_2 = 540 \quad [^\circ C]$$

Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st\ m} = \frac{9,4 + 9,75}{2} = 9,575 \quad [MPa]$$

$$p_1 = 9,4 \quad [MPa]$$

$$p_2 = 9,75 \quad [MPa]$$



**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 488,5 [°C] a střední teplotu média 9,575 [MPa]**

$$\lambda = 0,076 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 488,5 [°C] a střední teplotu média 9,575 [MPa]**

$$\eta = 29,007 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu média 488,5 [°C] a střední teplotu média 9,575 [MPa]**

$$Pr = 0,989 \text{ [-]}$$

**Měrný objem  $v$  pro střední teplotu média 488,5 [°C] a střední teplotu média 9,575 [MPa]**

$$v = 0,0338 \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (6.2.14)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,076}{0,0208} \cdot \left( \frac{10,645 \cdot 0,0208}{29,007 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0338} \right)^{0,8} \cdot 0,989^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 1605,059 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{34,722}{0,11} \cdot 0,0338 = 10,645 \text{ [m/s]}$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot n_h = \frac{\pi \cdot 0,0208^2}{4} \cdot 162 \cdot 2 = 0,11 \text{ [m}^2\text{]}$$

**Množství páry v deskovém přehříváku**

$$M_{pp} = 33,33 \text{ [kg/s]}$$

### 6.2.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{424,65 - 166,86}{\ln\left(\frac{424,65}{166,86}\right)} = 275,974 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.2.15)$$

$$\Delta t_v = 861,65 - 437 = 424,65 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = 706,86 - 540 = 166,86 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### 6.2.3 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = 3,14 \cdot 0,032 \cdot 25,247 \cdot 162 = 411,173 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.2.16)$$

### 6.2.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{př.výst.} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{77,340 \cdot 275,974 \cdot 411,173}{2,885} \cdot 10^{-3} \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (6.2.17)$$

$$Q_k^{př.výst.} = 3042,248 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

## 6.3 Část výparníku v oblasti výstupního přehříváku

Stěny výparníku			
počet trubek	$n_{tr}$	31	[–]
vnější průměr trubky	$D$	0,0603	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0503	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,005	[m]

### 6.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 36,393 = 30,934 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (6.3.1)$$

Součinitel tepelné efektivity:

$$\Psi = 0,85 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

**Součinitel přestupu tepla na straně spalín pro podélné proudění**

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 11,731 + 24,662 = 36,393 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (6.3.2)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m [W/m^2 \cdot K] \quad (6.3.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,091}{0,22} \cdot \left( \frac{5,550 \cdot 0,22}{0,000131} \right)^{0,8} \cdot 0,618^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 11,731 [W/m^2 \cdot K]$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 25,523}{464,652} = 0,22 [m] \quad (6.3.4)$$

Světlý průřez kanálu

$$F = (6,602 \cdot 4,982) - [(82 \cdot 0,038) \cdot 0,038] - [(4,982 \cdot 0,0603) \cdot 2] - [(31 \cdot 0,0603) \cdot 0,0603] - [(0,032 \cdot 4,982) \cdot 41] [m^2] \quad (6.3.5)$$

$$F = 25,523 [m^2]$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot \left\{ (6,602 + 4,982) + [(0,038 \cdot 82) + 0,038] + [(0,0603 \cdot 31) + 0,0603] + [(4,982 + 0,0603) \cdot 2] + [(4,982 + 0,032) \cdot 41] \right\} \quad (6.3.6)$$

$$O = 464,652 [m]$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \quad (6.3.7)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,195 \cdot (784,255 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{345 + 273,15}{784,255 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{345 + 273,15}{784,255 + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 24,662 [W/m^2 K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$a$  je stejný jako u výstupního přehříváku (6.2.9)

Optická hustota spalin

$k \cdot p \cdot s$  je stejná jako u výstupního přehříváku (6.2.10)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$k_{sp}$  je stejný jako u výstupního přehříváku (6.2.11)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 320 + \Delta t = 345 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.3.8)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Teplota média v trubkách výparníku je stejná na vstupu i výstupu.

$$t_{st\ m} = 320 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### 6.3.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{541,65 - 386,86}{\ln\left(\frac{541,65}{386,86}\right)} = 459,922 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.3.9)$$

$$\Delta t_v = 861,65 - 320 = 541,65 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = 706,86 - 320 = 386,86 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### 6.3.3 Výhřevná plocha

$$S = (2 \cdot 4,982 \cdot 2,4) + (3,173 \cdot 6,602) = 44,862 \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.3.10)$$

### 6.3.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{výp} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{30,934 \cdot 459,922 \cdot 44,862}{2,885} \cdot 10^{-3} \quad (6.3.11)$$

$$Q_k^{výp} = 221,257 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

## 6.4 Část stropního přehříváku v oblasti výstupního přehříváku

Stropový přehřívák			
počet trubek	$n_{tr}$	82	[-]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0308	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,0036	[m]
délka trubky	$l_{tr}$	2,4	[m]

### 6.4.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{36,505} + \frac{1}{1622,87}} = 30,346 [W/m^2K] \quad (6.4.1)$$

Součinitel tepelné efektivity:

$$\psi = 0,85 [W/m^2K]$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín pro podélné proudění:

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 11,731 + 24,774 = 36,505 [W/m^2K] \quad (6.4.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$\alpha_k$  je totožný jako u výparníku v oblasti výstupního přehříváku (6.3.3)

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2K] \quad (6.4.3)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,1975 \cdot (784,225 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{348,5 + 273,15}{784,225 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{348,5 + 273,15}{784,225 + 273,15}\right)}$$

$$\alpha_s = 24,774 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalín

$a$  je stejný jako u výstupního přehříváku (6.2.9)

Optická hustota spalin

$k \cdot p \cdot s$  je stejná jako u výstupního přehříváku (6.2.10)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$k_{sp}$  je stejný jako u výstupního přehříváku (6.2.11)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 323,5 + \Delta t = 348,5 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6.4.4)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{st\ m} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{323 + 324}{2} = 323,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_1 = 323 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_2 = 324 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{10,75 + 10,85}{2} = 10,8 \text{ [MPa]}$$

$$p_1 = 10,75 \text{ [MPa]}$$

$$p_2 = 10,85 \text{ [MPa]}$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 323,5 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$\lambda = 0,098 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 323,5 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$\eta = 60,956 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu média 323,5 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$Pr = 1,15 \text{ [-]}$$

**Měrný objem pro střední teplotu média 323,5 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$v = 0,0194 [m^3/kg]$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{v} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m [W/m^2 \cdot K] \quad (6.4.5)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,098}{0,0308} \cdot \left( \frac{9,734 \cdot 0,0308}{60,956 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0194} \right)^{0,8} \cdot 1,15^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 1622,87 [W/m^2 \cdot K]$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{33,33 \cdot 0,92}{0,0611} \cdot 0,0194 = 9,734 [m/s] \quad (6.4.6)$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} \cdot 82 \cdot 1 = 0,0611 [m^2] \quad (6.4.7)$$

**Množství páry ve stropním přehříváku přehříváku**

$$M_{pp} = 33,33 [kg/s]$$

#### 6.4.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{538,65 - 382,56}{\ln \left( \frac{538,65}{382,56} \right)} = 456,331 [°C] \quad (6.4.8)$$

$$\Delta t_v = 861,65 - 323 = 538,65 [°C]$$

$$\Delta t_m = 706,86 - 324 = 382,56 [°C]$$

#### 6.4.3 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,038 \cdot 2,4 \cdot 82 = 23,494 [m^2] \quad (6.4.9)$$

#### 6.4.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{strop} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{30,346 \cdot 456,331 \cdot 23,494}{2,885} \cdot 10^{-3} [kJ/m^3] \quad (6.4.10)$$

$$Q_k^{strop} = 112,783 [kJ/m^3]$$

#### 6.5 Bilance celé oblasti deskového přehříváku

$$Q_k = Q_k^{př.výst.} + Q_k^{výp} + Q_k^{strop} \quad (6.5.1)$$

$$Q_k = 3042,248 + 221,257 + 112,783 = 3376,288 [kJ/m^3]$$

##### 6.5.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_k}{Q_b} \cdot 100 = \frac{3374,595 - 3376,288}{3374,595} \cdot 100 = -0,050 [\%] \quad (6.5.2)$$

Odchylka je menší jak 2%, proto můžeme výpočet teploty plochy považovat za ukončený.



## 7 Oblast mříže výparníku

### 7.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (12405,95 - 11910,68) = 491,861 \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (7.1.1)$$

Střední teplota proudu spalin:

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{706,86 + 685,934}{2} = 696,377 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (7.1.2)$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu spalin 696,377 [°C]**

$$\lambda = 0,086 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel kinematické viskozity  $\nu$  pro střední teplotu spalin 696,377 [°C]**

$$\nu = 0,000113 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu spalin 696,377 [°C]**

$$Pr = 0,627 \text{ [-]}$$

**Rozměry oblasti mříže**

$$a = 3,943 \text{ [m]}$$

$$b = 6,602 \text{ [m]}$$

$$c = 0,300 \text{ [m]}$$

Rychlost proudu spalin:

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \left( 1 + \frac{\vartheta}{273,15} \right) = \frac{2,885 \cdot 13,838}{19,612} \cdot \left( 1 + \frac{696,377}{273,15} \right) = 7,225 \text{ [m/s]} \quad (7.1.3)$$

Světlý průřez proudu spalin:

$$F_{sp} = (6,602 \cdot 3,943) - (3,943 \cdot 0,0603 \cdot 27) = 19,612 \text{ [m}^2\text{]} \quad (7.1.4)$$

## 7.2 Oblast mříže výparníku

Výparníková mříž			
počet trubek	$n_{tr}$	27	[–]
počet řad	$z$	3	[–]
příčná rozteč	$s_1$	0,240	[m]
Podélná rozteč	$s_2$	0,130	[m]
vnější průměr trubky	$D$	0,0603	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0491	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,0056	[m]
Délka trubky	$l_{tr}$	3,943	[m]

### 7.2.1 Součinitel prostupu tepla:

$$k = \Psi \cdot \alpha_1 = 0,85 \cdot 73,361 = 62,357 [W/m^2K] \quad (7.2.1)$$

Součinitel tepelné efektivity

$$\Psi = 0,85 [W/m^2K]$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 48,312 + 25,049 = 73,361 [W/m^2K] \quad (7.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W/m^2K] \quad (7.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,9225 \cdot 1,005 \cdot \frac{0,086}{0,0603} \cdot \left( \frac{7,225 \cdot 0,0603}{0,000113} \right)^{0,65} \cdot 0,627^{0,33} = 48,332 [W/m^2K]$$

Oprava na počet podélných řad  $c_z$ :

$$z < 10 \Rightarrow c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (z - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči  $\sigma_1$  a poměrné podélné rozteči  $\sigma_2$

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[ 1 + (2 \cdot 3,98 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{2,156}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 1,005 \quad (7.2.4)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,240}{0,0603} = 3,98$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,130}{0,0603} = 2,156$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2 K] \quad (7.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,242 \cdot (704,11 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{345 + 273,15}{704,11 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{345 + 273,15}{704,11 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 25,378 [W/m^2 K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,277} = 0,242 \quad (7.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (18,268 \cdot 0,280 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,539 = 0,277 \quad (7.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) [1/m \cdot MPa] \quad (7.2.8)$$

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,195}{3,16 \cdot \sqrt{0,025 \cdot 0,539}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{696,377 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_{sp} = 18,350 [1/m \cdot MPa]$$

**Efektivní tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,240 \cdot 0,130}{0,0603^2} - 1 \right) = 0,539 \text{ [m]} \quad (7.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 345 \text{ [°C]} \quad (7.2.10)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [°C]}$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{st\ m} = 320 \text{ [°C]}$$

**7.2.2 Střední logaritmický teplotní spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{386,86 - 365,894}{\ln\left(\frac{386,86}{365,894}\right)} = 376,279 \text{ [°C]} \quad (7.2.11)$$

$$\Delta t_v = 706,86 - 320 = 386,86 \text{ [°C]}$$

$$\Delta t_m = 685,934 - 320 = 365,894 \text{ [°C]}$$

**7.2.3 Výhřevná plocha**

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} \cdot z = 3,14 \cdot 0,0603 \cdot 3,943 \cdot 27 \cdot 3 = 60,503 \text{ [m}^2\text{]} \quad (7.2.12)$$

**7.3 Rovnice sdílení tepla**

$$Q_k^{výp.mříže} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{62,357 \cdot 376,279 \cdot 60,503}{2,885} \cdot 10^{-3} \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (7.3.1)$$

$$Q_k^{výp.mříže} = 492,121 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

**7.3.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla**

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_k}{Q_b} \cdot 100 = \frac{491,861 - 492,121}{491,861} \cdot 100 = -0,053 [\%] \quad (7.3.2)$$

Odchylka je menší jak 5%, proto můžeme výpočet teploty plochy považovat za ukončený.

## 8 Oblast přehříváku P4

### 8.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (11906,31 - 10846,6041) = 1052,4 \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (8.1.1)$$

Střední teplota proudu spalín:

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{685,934 + 575,655}{2} = 630,774 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.1.2)$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu spalín 630,774 [°C]**

$$\lambda = 0,082 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel kinematické viskozity  $\nu$  pro střední teplotu spalín 630,774 [°C]**

$$\nu = 0,000105 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu spalín 630,774 [°C]**

$$Pr = 0,630 \text{ [–]}$$

**Rozměry oblasti Přehříváku P2**

$$a = 3,943 \text{ [m]}$$

$$b = 6,602 \text{ [m]}$$

$$c = 1,280 \text{ [m]}$$

Rychlost proudu spalín

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \left( 1 + \frac{\vartheta}{273,15} \right) = \frac{2,885 \cdot 14,133}{19,92} \cdot \left( 1 + \frac{630,774}{273,15} \right) = 6,773 \text{ [m/s]} \quad (8.1.3)$$

Světlý průřez proudu spalín:

$$F_{sp} = (6,602 \cdot 3,943) - (3,943 \cdot 0,038 \cdot 40) - (82 \cdot 0,038 \cdot 0,038) = 19,92 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.1.4)$$

## 8.2 Oblast přehříváku P4

Přehřívák P4			
počet trubek	$n_{tr}$	40	[–]
počet řad	$z$	2	[–]
příčná rozteč	$s_1$	0,160	[m]
Podélná rozteč	$s_2$	0,065	[m]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0308	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,0036	[m]
Délka trubky	$l_{tr}$	28,96	[m]

### 8.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{89,729} + \frac{1}{2699,919}} = 72,363 [W/m^2K] \quad (8.2.1)$$

Součinitel tepelné efektivnosti:

$$\psi = 0,85 [W/m^2K]$$

**Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění**

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 70,921 + 18,808 = 89,729 [W/m^2K] \quad (8.2.2)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí**

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} [W/m^2K] \quad (8.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,970 \cdot 0,362 \cdot \frac{0,079}{0,038} \cdot \left( \frac{6,773 \cdot 0,038}{0,0001} \right)^{0,6} \cdot 0,632^{0,33} = 69,921 [W/m^2K]$$

Oprava na počet podélných řad  $c_z$ :

$$z < 10 \text{ a } \sigma_1 \geq 3$$

$$c_z = 4 \cdot 8^{0,02} - 3,2 = 0,970$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči  $\sigma_1$  a poměrné podélné rozteči  $\sigma_2$

$$\varphi_{\sigma} = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} = \frac{4,211 - 1}{2,712 - 1} = 1,875 \quad (8.2.4)$$

$$\sigma_2' = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 4,211^2 + 1,711^2} = 2,712 \quad (8.2.5)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,160}{0,038} = 4,211$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,065}{0,038} = 1,711$$

$$1,7 < \varphi_{\sigma} \leq 4,5 \quad \sigma_1 \geq 3$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_{\sigma}^{0,1} = 0,362$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2K] \quad (8.2.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,184 \cdot (630,774 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{404,5 + 273,15}{630,774 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{404,5 + 273,15}{630,774 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 17,984 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,203} = 0,184 \quad (8.2.7)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (26,538 \cdot 0,274 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,279 = 0,203 \quad (8.2.8)$$



Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad [1/m \cdot MPa] \quad (8.2.9)$$

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,190}{3,16 \cdot \sqrt{0,025 \cdot 0,279}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{630,77 + 273,15}{1000} \right) = 26,538 \quad [1/m \cdot MPa]$$

### 8.2.2 Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,160 \cdot 0,065}{0,038^2} - 1 \right) = 0,279 \quad [m] \quad (8.2.10)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{stm} + \Delta t = 379,5 + \Delta t = 404,5 \quad [^\circ C] \quad (8.2.11)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \quad [^\circ C]$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{stm} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{403 + 356}{2} = 379,5 \quad [^\circ C]$$

$$t_1 = 403 \quad [^\circ C]$$

$$t_2 = 356 \quad [^\circ C]$$

Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{10,25 + 10,45}{2} = 10,35 \quad [MPa]$$

$$p_1 = 10,25 \quad [MPa]$$

$$p_2 = 10,45 \quad [MPa]$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 379,5  $[^\circ C]$  a střední tlak média 10,35  $[MPa]$**

$$\lambda = 0,075 \quad [W/mK]$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 379,5  $[^\circ C]$  a střední tlak média 10,35  $[MPa]$**

$$\eta = 25,660 \cdot 10^{-6} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

**Prandtlovo číslo Pr pro střední teplotu média 379,5 [°C] a střední tlak média 10,35 [MPa]**

$$Pr = 1,264 [-]$$

**Měrný objem v pro střední teplotu média 379,5 [°C] a střední tlak média 10,35 [MPa]**

$$v = 0,0248 [\text{m}^3/\text{kg}]$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8.2.12)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,075}{0,0308} \cdot \left( \frac{13,117 \cdot 0,0308}{25,660 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0248} \right)^{0,8} \cdot 1,264^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 2699,919 [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{31,944}{0,06} \cdot 0,0248 = 13,117 [\text{m}/\text{s}]$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} \cdot 81 = 0,06 [\text{m}^2]$$

**Množství páry v přehříváku P4**

$$M_{pp} = 31,944 [\text{kg}/\text{s}]$$

### 8.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{282,894 - 219,655}{\ln \left( \frac{282,894}{219,655} \right)} = 249,942 [^\circ\text{C}] \quad (8.2.13)$$

$$\Delta t_v = 685,944 - 403 = 282,894 [^\circ\text{C}]$$

$$\Delta t_m = 576,655 - 356 = 219,655 [^\circ\text{C}]$$

### 8.2.4 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} \cdot z = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 28,96 \cdot 40 \cdot 2 = 280,04 [m^2] \quad (8.2.14)$$

### 8.2.5 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{P4} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{72,363 \cdot 249,942 \cdot 280,04}{2,885} \cdot 10^{-3} [kJ/m^3] \quad (8.2.15)$$

$$Q_k^{P4} = 1755,792 [kJ/m^3]$$

## 8.3 Část stropního přehříváku v oblasti přehříváku P4

Stropový přehřívák			
počet trubek	$n_{tr}$	82	[-]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0308	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,0036	[m]
délka trubky	$l_{tr}$	1,894	[m]

### 8.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{31,411} + \frac{1}{3269,957}} = 26,445 [W/m^2K] \quad (8.3.1)$$

Součinitel tepelné efektivity:

$$\psi = 0,85 [W/m^2K]$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalín pro podélné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 14,863 + 16,548 = 31,411 [W/m^2K] \quad (8.3.2)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekci**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m [W/m^2 \cdot K] \quad (8.3.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,082}{0,23} \cdot \left( \frac{6,773 \cdot 0,23}{0,0001} \right)^{0,8} \cdot 0,632^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 14,863 [W/m^2 \cdot K]$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 19,92}{345,878} = 0,23 [m] \quad (8.3.4)$$

Světlý průřez kanálu

$$F = (6,602 \cdot 4,982) - [(82 \cdot 0,038) \cdot 0,038] - [40 \cdot (0,038 \cdot 3,943)] [m^2] \quad (8.3.5)$$

$$F = 19,92 [m^2]$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot \{(6,602 + 3,943) + [(82 \cdot 0,038) + 0,038] + [40 \cdot (0,038 + 3,943)]\} \quad (8.3.6)$$

$$O = 345,878 [m]$$

Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2 K] \quad (8.3.7)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,184 \cdot (630,774 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{349,25 + 273,15}{630,774 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \left( \frac{349,25 + 273,15}{630,774 + 273,15} \right)}$$

$$\alpha_s = 16,548 [W/m^2 K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$a$  je stejný jako u přehříváku P4 (8.2.7)

Optická hustota spalin

$k \cdot p \cdot s$  je stejná jako u přehříváku P4 (8.2.8)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$k_{sp}$  je stejný jako u přehříváku P4 (8.2.9)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 324,25 + \Delta t = 349,25 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (8.3.8)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{st\ m} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{323 + 324}{2} = 324,25 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_1 = 324 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_2 = 324,4 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{10,75 + 10,85}{2} = 10,8 \text{ [MPa]}$$

$$p_1 = 10,75 \text{ [MPa]}$$

$$p_2 = 10,85 \text{ [MPa]}$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 324,25 [°C] a střední tlak média v trubkách**

$$\lambda = 0,099 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 324,25 [°C] a střední tlak média v trubkách**

$$\eta = 28,474 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu média 324,25 [°C] a střední tlak média v trubkách**

$$Pr = 1,376 [-]$$

**Měrný objem  $v$  pro pro střední teplotu média 324,25 [°C] a střední tlak média v trubkách**

$$v = 0,0221 [m^3/kg]$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \quad (8.3.9)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,099}{0,0308} \cdot \left( \frac{11,088 \cdot 0,0308}{28,474 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0221} \right)^{0,8} \cdot 1,376^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 3269,957 [W/m^2 \cdot K]$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{33,33 \cdot 0,92}{0,0611} \cdot 0,0194 = 11,088 [m/s]$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} \cdot 82 \cdot 1 = 0,0611 [m^2]$$

**Množství páry ve stropním přehříváku přehříváku**

$$M_{pp} = 33,33 [kg/s]$$

### 8.3.2 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{361,894 - 251,155}{\ln \left( \frac{361,894}{251,155} \right)} = 303,161 [°C] \quad (8.3.10)$$

$$\Delta t_v = 685,934 - 324, = 361,894 [°C]$$

$$\Delta t_m = 576,655 - 324,4 = 251,155 [°C]$$

### 8.3.3 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,038 \cdot 1,894 \cdot 82 = 18,541 \text{ [m}^2\text{]} \quad (8.3.11)$$

### 8.3.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{strop} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{26,445 \cdot 303,161 \cdot 18,541}{2,885} \cdot 10^{-3} \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (8.3.12)$$

$$Q_k^{strop} = 51,541 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

## 8.4 Bilance celé oblasti deskového přehříváku

$$Q_k = Q_k^{P4} + Q_k^{strop} \quad (8.4.1)$$

$$Q_k = 1755,792 + 51,541 = 1807,32 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

### 8.4.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_k}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1806,443 - 1807,32}{1806,443} \cdot 100 = -0,049 \text{ [%]} \quad (8.4.2)$$

Odchylka je menší jak 2%, proto můžeme výpočet teploty plochy považovat za ukončený.

## 9 Oblast přehříváku P5

### 9.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (10087,34 - 8221,935) = 1852,935 \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (9.1.1)$$

Střední teplota proudu spalín:

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{576,655 + 475,221}{2} = 525,438[^\circ\text{C}] \quad (9.1.2)$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu spalín 525,438 [°C]**

$$\lambda = 0,070 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel kinematické viskozity  $\nu$  pro střední teplotu spalín 525,438 [°C]**

$$\nu = 0,000082 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu spalín 525,438 [°C]**

$$Pr = 0,643 \text{ [-]}$$

**Rozměry oblasti Přehříváku P2**

$$a = 3,943 \text{ [m]}$$

$$b = 6,602 \text{ [m]}$$

$$c = 1,920 \text{ [m]}$$

Rychlost proudu spalín

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \left( 1 + \frac{\vartheta}{273,15} \right) = \frac{2,885 \cdot 14,134}{19,92} \cdot \left( 1 + \frac{525,438}{273,15} \right) = 6,470 \text{ [m/s]} \quad (9.1.3)$$

Světlý průřez proudu spalín

$$F_{sp} = (6,602 \cdot 3,943) - (3,943 \cdot 0,038 \cdot 40) - (82 \cdot 0,038 \cdot 0,038) = 19,92 \text{ [m}^2\text{]} \quad (9.1.4)$$



## 9.2 Oblast přehříváku P5

Přehřívák P5			
počet trubek	$n_{tr}$	40	[–]
počet řad	$z$	2	[–]
příčná rozteč	$s_1$	0,160	[m]
Podélná rozteč	$s_2$	0,065	[m]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0308	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,0036	[m]
Délka trubky	$l_{tr}$	43,44	[m]

### 9.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{84,265} + \frac{1}{2491,195}} = 69,282 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.2.1)$$

Součinitel tepelné efektivity:

$$\psi = 0,85 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 70,262 + 14,003 = 84,265 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,6} \cdot Pr^{0,33} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.2.3)$$

$$\alpha_k = 1 \cdot 0,362 \cdot \frac{0,070}{0,038} \cdot \left( \frac{6,470 \cdot 0,038}{0,000082} \right)^{0,6} \cdot 0,643^{0,33} = 70,262 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Oprava na počet podélných řad  $c_z$ :

$$z > 10 \Rightarrow c_z = 1$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči  $\sigma_1$  a poměrné podélné rozteči  $\sigma_2$

$$\varphi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_2' - 1} = \frac{4,211 - 1}{2,712 - 1} = 1,875 \quad (9.2.4)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 4,211^2 + 1,711^2} = 2,712 \quad (9.2.5)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,160}{0,038} = 4,211$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,065}{0,038} = 1,711$$

$$1,7 < \varphi_\sigma \leq 4,5 \quad \sigma_1 \geq 3$$

$$c_s = 0,34 \cdot \varphi_\sigma^{0,1} = 0,362$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2K] \quad (9.2.6)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,194 \cdot (525,438 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{344 + 273,15}{525,438 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{344 + 273,15}{525,438 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 18,808 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,215} = 0,194 \quad (9.2.7)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (28,093 \cdot 0,274 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,279 = 0,215 \quad (9.2.8)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) \quad [1/m \cdot MPa] \quad (9.2.9)$$

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,188}{3,16 \cdot \sqrt{0,025 \cdot 0,279}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{525,438 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_{sp} = 28,093 \quad [1/m \cdot MPa]$$

### 9.2.2 Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,038 \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,160 \cdot 0,065}{0,038^2} - 1 \right) = 0,279 \quad [m] \quad (9.2.10)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 319 + \Delta t = 367 \quad [^\circ C] \quad (9.2.11)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \quad [^\circ C]$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{st\ m} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{356 + 328}{2} = 342 \quad [^\circ C]$$

$$t_1 = 356 \quad [^\circ C]$$

$$t_2 = 328 \quad [^\circ C]$$

Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{10,45 + 10,75}{2} = 10,6 \quad [MPa]$$

$$p_1 = 10,45 \quad [MPa]$$

$$p_2 = 10,75 \quad [MPa]$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 342 [°C] a střední tlak média 10,6 [MPa]**

$$\lambda = 0,091 \quad [W/mK]$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 342 [°C] a střední tlak média 10,6 [MPa]**

$$\eta = 36,787 \cdot 10^{-6} [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu média 342 [°C] a střední tlak média 10,6 [MPa]**

$$Pr = 1,314 [-]$$

**Měrný objem  $v$  pro střední teplotu média 342 [°C] a střední tlak média 10,6 [MPa]**

$$v = 0,0385 [\text{m}^3/\text{kg}]$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m [W/m^2 \cdot K] \quad (9.2.12)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,091}{0,0308} \cdot \left( \frac{20,373 \cdot 0,0308}{25,660 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0248} \right)^{0,8} \cdot 1,314^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 2491,195 [W/m^2 \cdot K]$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{31,944}{0,06} \cdot 0,0248 = 20,373 [m/s]$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} = \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} \cdot 81 = 0,06 [m^2]$$

**Množství páry v přehříváku P5**

$$M_{pp} = 31,944 [kg/s]$$

### 9.2.3 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{219,655 - 147,221}{\ln \left( \frac{219,655}{147,221} \right)} = 181,029 [^\circ\text{C}] \quad (9.2.13)$$

$$\Delta t_v = 576,655 - 356 = 219,655 [^\circ\text{C}]$$

$$\Delta t_m = 475,221 - 328 = 147,221 [^\circ\text{C}]$$

### 9.2.4 Výhřevná plocha

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} \cdot z = 3,14 \cdot 0,038 \cdot 43,44 \cdot 40 \cdot 2 = 420,057 \text{ [m}^2\text{]} \quad (9.2.14)$$

### 9.2.5 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{P5} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{69,282 \cdot 181,029 \cdot 420,057}{2,885} \cdot 10^{-3} \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (9.2.15)$$

$$Q_k^{P5} = 1826,314 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

## 9.3 Část stropního přehříváku v oblasti přehříváku P5

Stropový přehřívák			
počet trubek	$n_{tr}$	82	[–]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0308	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,0036	[m]
délka trubky	$l_{tr}$	1,676	[m]

### 9.3.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{28,578} + \frac{1}{5936,490}} = 24,175 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.3.1)$$

Součinitel tepelné efektivity:

$$\psi = 0,85 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

**Součinitel přestupu tepla na straně spalín pro podélné proudění**

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 14,9801 + 13,598 = 28,578 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.3.2)$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí**

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (9.3.3)$$

$$\alpha_k = 0,023 \cdot \frac{0,082}{0,23} \cdot \left( \frac{6,470 \cdot 0,23}{0,000082} \right)^{0,8} \cdot 0,643^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 14,980 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

Ekvivalentní průměr

$$d_e = \frac{4 \cdot F}{O} = \frac{4 \cdot 19,92}{345,878} = 0,23 \text{ [m]} \quad (9.3.4)$$

Světlý průřez kanálu

$$F = (6,602 \cdot 4,982) - [(82 \cdot 0,038) \cdot 0,038] - [40 \cdot (0,038 \cdot 3,943)] \quad (9.3.5)$$

$$F = 19,92 \text{ [m}^2\text{]}$$

Obvod průřezu kanálu

$$O = 2 \cdot \{(6,602 + 3,943) + [(82 \cdot 0,038) + 0,038] + [40 \cdot (0,038 + 3,943)]\} \quad (9.3.6)$$

$$O = 345,878 \text{ [m]}$$

**Součinitel přestupu tepla sáláním**

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{T_z}{T}\right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (9.3.7)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,194 \cdot (525,438 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{349,25 + 273,15}{525,438 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \left(\frac{349,25 + 273,15}{525,438 + 273,15}\right)}$$

$$\alpha_s = 13,598 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$a$  je stejný jako u přehříváku P5 (9.2.7)

Optická hustota spalin

$k \cdot p \cdot s$  je stejná jako u přehříváku P5 (9.2.8)

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$k_{sp}$  je stejný jako u přehříváku P5 (9.2.9)

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 324,25 + \Delta t = 349,65 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (9.3.8)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{st\ m} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{324,5 + 324,8}{2} = 324,65 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_1 = 324,5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_2 = 324,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{10,75 + 10,85}{2} = 10,8 \text{ [MPa]}$$

$$p_1 = 10,75 \text{ [MPa]}$$

$$p_2 = 10,85 \text{ [MPa]}$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 324,65 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$\lambda = 0,327 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 324,65 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$\eta = 59,505 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu média 324,65 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$Pr = 1,160[-]$$

**Měrný objem pro střední teplotu média 324,65 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$v = 0,020 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m [W/m^2 \cdot K] \quad (9.3.9)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,327}{0,0308} \cdot \left( \frac{10,683 \cdot 0,0308}{59,505 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0200} \right)^{0,8} \cdot 1,160^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 5936,490 [W/m^2 \cdot K]$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{33,33 \cdot 0,92}{0,0611} \cdot 0,0194 = 10,683 [m/s]$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} \cdot 82 \cdot 1 = 0,0611 [m^2]$$

**Množství páry ve stropním přehříváku přehříváku**

$$M_{pp} = 33,33 [kg/s]$$

**9.3.2 Střední logaritmický teplotní spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{251,155 - 150,421}{\ln \left( \frac{251,155}{150,421} \right)} = 196,503 [^{\circ}C] \quad (9.3.10)$$

$$\Delta t_v = 576,655 - 324,5 = 251,155 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = 475,221 - 324,8 = 150,421 [^{\circ}C]$$

**9.3.3 Výhřevná plocha**

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,038 \cdot 1,676 \cdot 82 = 16,407 [m^2] \quad (9.3.11)$$



### 9.3.4 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{strop} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{24,175 \cdot 196,503 \cdot 16,407}{2,885} \cdot 10^{-3} [kJ/m^3] \quad (9.3.12)$$

$$Q_k^{strop} = 27,018 [kJ/m^3]$$

## 9.4 Bilance celé oblasti deskového přehříváku

$$Q_k = Q_k^{P5} + Q_k^{strop} \quad (9.4.1)$$

$$Q_k = 1826,314 + 27,018 = 1853,3321 [kJ/m^3]$$

### 9.4.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_k}{Q_b} \cdot 100 = \frac{1852,553 - 1853,3321}{1852,553} \cdot 100 = -0,042 [\%] \quad (9.4.2)$$

Odchylka je menší jak 2%, proto můžeme výpočet teploty plochy považovat za ukončený.

## 10 Oblast mříže výparníku

### 10.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (8221,965 - 8179,356) = 42,286 \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (10.1.1)$$

Střední teplota proudu spalín:

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{475,221 + 472,883}{2} = 474,052 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.1.2)$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu spalín 474,052 [°C]**

$$\lambda = 0,065 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel kinematické viskozity  $\nu$  pro střední teplotu spalín 474,052 [°C]**

$$\nu = 0,000073 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu spalín 474,052 [°C]**

$$Pr = 0,648 \text{ [-]}$$

**Rozměry oblasti mříže**

$$a = 3,943 \text{ [m]}$$

$$b = 6,602 \text{ [m]}$$

$$c = 0,300 \text{ [m]}$$

Rychlost proudu spalín

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \left( 1 + \frac{\vartheta}{273,15} \right) = \frac{2,885 \cdot 14,134}{21,836} \cdot \left( 1 + \frac{474,052}{273,15} \right) = 5,107 \text{ [m/s]} \quad (10.1.3)$$

Světlý průřez proudu spalín

$$F_{sp} = (6,602 \cdot 3,943) - (3,943 \cdot 0,038 \cdot 28) = 21,836 \text{ [m}^2\text{]} \quad (10.1.4)$$

## 10.2 Oblast mříže stropového přehříváku

Mříž stropového přehříváku			
počet trubek	$n_{tr}$	82	[–]
počet řad	$z$	3	[–]
příčná rozteč	$s_1$	0,240	[m]
Podélná rozteč	$s_2$	0,130	[m]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,0308	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,0036	[m]
Délka trubky	$l_{tr}$	10,86	[m]

### 10.2.1 Součinitel prostupu tepla:

$$k = \psi \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = 0,85 \cdot \frac{1}{\frac{1}{27,661} + \frac{1}{1818,382}} = 23,159 [W/m^2K] \quad (10.2.1)$$

Součinitel tepelné efektivity:

$$\psi = 0,85 [W/m^2K]$$

Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k + \alpha_s = 7,663 + 19,998 = 27,661 [W/m^2K] \quad (10.2.2)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,2 \cdot c_z \cdot c_s \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0,65} \cdot Pr^{0,33} [W/m^2K] \quad (10.2.3)$$

$$\alpha_k = 0,2 \cdot 0,9225 \cdot 1,005 \cdot \frac{0,065}{0,038} \cdot \left( \frac{5,107 \cdot 0,038}{0,0000728} \right)^{0,65} \cdot 0,648^{0,33} = 7,663 [W/m^2K]$$

Oprava na počet podélných řad  $c_z$ :

$$z < 10 \Rightarrow c_z = 0,91 + 0,0125 \cdot (z - 2) = 0,91 + 0,0125 \cdot (3 - 2) = 0,9225$$

Oprava na uspořádání svazku v závislosti na poměrné příčné rozteči  $\sigma_1$  a poměrné podélné rozteči  $\sigma_2$

$$c_s = \left[ 1 + (2 \cdot \sigma_1 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{\sigma_2}{2} \right)^3 \right]^{-2} = \left[ 1 + (2 \cdot 6,32 - 3) \cdot \left( 1 - \frac{3,42}{2} \right)^3 \right]^{-2} = 0,166 \quad (10.2.4)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,240}{0,038} = 6,32$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,130}{0,038} = 3,42$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a \cdot T^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{T_z}{T} \right)^{3,6}}{1 - \frac{T_z}{T}} [W/m^2K] \quad (10.2.5)$$

$$\alpha_s = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,323 \cdot (474,052 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left( \frac{350,3 + 273,15}{474,052 + 273,15} \right)^{3,6}}{1 - \frac{345 + 273,15}{474,052 + 273,15}}$$

$$\alpha_s = 19,998 [W/m^2K]$$

Stupeň černosti povrchu stěn ohniště, při výpočtu se uvažuje  $a_{st} = 0,8$

Stupeň černosti proudu spalin

$$a = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-0,390} = 0,323 \quad (10.2.6)$$

Optická hustota spalin

$$k \cdot p \cdot s = (k_{sp} \cdot r_{sp} + k_p \cdot \mu) \cdot p \cdot s = (15,694 \cdot 0,274 + 0) \cdot 0,1 \cdot 0,907 = 0,390 \quad (10.2.7)$$

Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{p_{sp} \cdot s}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{T}{1000} \right) [1/m \cdot MPa] \quad (10.2.8)$$

$$k_{sp} = \left( \frac{7,8 + 16 \cdot 0,190}{3,16 \cdot \sqrt{0,025 \cdot 0,907}} - 1 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{474,052 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_{sp} = 15,694 [1/m \cdot MPa]$$

**10.2.2 Efektivní tloušťka sálavé vrstvy**

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) = 0,9 \cdot 0,0603 \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,240 \cdot 0,130}{0,038^2} - 1 \right) = 0,907 \text{ [m]} \quad (10.2.9)$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 350,3 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.2.10)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{st\ m} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{324,8 + 325,8}{2} = 325,3 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_1 = 324,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_2 = 325,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Střední tlak média v trubkách:

$$p_{st} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{10,75 + 10,85}{2} = 10,8 \text{ [MPa]}$$

$$p_1 = 10,75 \text{ [MPa]}$$

$$p_2 = 10,85 \text{ [MPa]}$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu média 325,3 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$\lambda = 0,098 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel dynamické viskozity  $\eta$  pro střední teplotu média 325,3 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$\eta = 58,67 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu média 325,3 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$Pr = 1,166 \text{ [-]}$$

**Měrný objem  $v$  pro střední teplotu média 325,3 [°C] a střední tlak média 10,8 [MPa]**

$$v = 0,0203 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

**Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně média**

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{w \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l \cdot c_m [W/m^2 \cdot K] \quad (10.2.11)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{0,098}{0,0308} \cdot \left( \frac{11,227 \cdot 0,0308}{258,67 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0203} \right)^{0,8} \cdot 1,166^{0,4} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_2 = 1818,382 [W/m^2 \cdot K]$$

Rychlost proudu média

$$w = \frac{M_{pp}}{f} \cdot v = \frac{33,33}{0,060} \cdot 0,020 = 11,227 [m/s]$$

Průřez pro páru

$$f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4} \cdot n_{tr} \cdot z = \frac{\pi \cdot 0,0308^2}{4} \cdot 82 \cdot 1 = 0,060 [m^2]$$

**Množství páry ve stropním přehříváku přehříváku**

$$M_{pp} = 33,33 [kg/s]$$

**10.2.3 Střední logaritmický teplotní spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m} \right)} = \frac{150,421 - 147,083}{\ln \left( \frac{150,421}{147,083} \right)} = 148,746 [^{\circ}C] \quad (10.2.12)$$

$$\Delta t_v = 475,221 - 324,8 = 150,421 [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_m = 472,883 - 325,8 = 147,083 [^{\circ}C]$$

**10.2.4 Výhřevná plocha**

$$S = \pi \cdot D \cdot l_{tr} \cdot n_{tr} = \pi \cdot 0,038 \cdot 10,86 \cdot 82 = 35,437 [m^2] \quad (10.2.13)$$

**10.2.5 Rovnice sdílení tepla**

$$Q_k^{mříž} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{23,159 \cdot 148,746 \cdot 35,437}{2,8874} \cdot 10^{-3} [kJ/m^3] \quad (10.2.14)$$

$$Q_k^{mříž} = 42,318 [kJ/m^3]$$

**10.2.6 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla**

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_k}{Q_b} \cdot 100 = \frac{42,286 - 42,318}{42,286} \cdot 100 = -0,077 [\%] \quad (10.3.2)$$

Odchylka je menší jak 5%, proto můžeme výpočet teploty plochy považovat za ukončený.

## 11 Oblast Ekonomizéru

### 11.1 Rovnice tepelné bilance na straně spalín

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2) = 0,993 \cdot (8179,356 - 3492,499) = 4654,572 \text{ [KJ/m}^3\text{]} \quad (11.1.1)$$

Střední teplota proudu spalín

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{472,883 + 205,42}{2} = 339,152 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11.1.2)$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu spalín 339,152 [°C]**

$$\lambda = 0,053 \text{ [W/mK]}$$

**Součinitel kinematické viskozity  $\nu$  pro střední teplotu spalín 339,152 [°C]**

$$\nu = 0,000052 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu spalín 339,152 [°C]**

$$Pr = 0,648 \text{ [-]}$$

Rozměry oblasti mříže

$$a = 3,880 \text{ [m]}$$

$$b = 6,602 \text{ [m]}$$

$$c = 1,700 \text{ [m]}$$

Rychlost proudu spalín:

$$w_{sp} = \frac{M_{pv} \cdot O_{sp}}{F_{sp}} \left( 1 + \frac{\vartheta}{273,15} \right) = \frac{2,885 \cdot 14,331}{17,1} \cdot \left( 1 + \frac{339,152}{273,15} \right) = 5,419 \text{ [m/s]} \quad (11.1.3)$$

Světlý průřez proudu spalín:

$$F_{sp} = (6,602 \cdot 3,943) - (3,943 \cdot 0,038 \cdot 28) = 17,1 \text{ [m}^2\text{]} \quad (11.1.3)$$



## 11.2 Oblast ekonomizéru

Ekonomizér			
počet trubek	$n_{tr}$	702	[–]
počet řad	$z$	27	[–]
příčná rozteč	$s_1$	0,140	[m]
Podélná rozteč	$s_2$	0,060	[m]
vnější průměr trubky	$D$	0,038	[m]
vnitřní průměr trubky	$d$	0,030	[m]
tloušťka stěny	$tl$	0,004	[m]
délka trubky	$l_{tr}$	6,6	[m]
výška žebra	$h_z$	0,013	[m]
rozteč žeber	$s_z$	0,00416	[m]
tloušťka žebra	$\delta_z$	0,001	[m]
průměr žebra	$D_z$	0,064	[m]

### 11.2.1 Součinitel prostupu tepla

$$k = \Psi \cdot \alpha_{1r} = 0,85 \cdot 29,749 = 25,286 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (11.1.3)$$

Součinitel tepelné efektivity:

$$\Psi = 0,85 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

### 11.2.2 Součinitel přestupu tepla na straně spalin pro příčné proudění

$$\alpha_1 = \alpha_k = 44,586 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (11.1.4)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = 0,23 \cdot c_z \cdot \varphi_{\sigma}^{0,2} \cdot \frac{\lambda}{S_z} \cdot \left(\frac{D}{S_z}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h_z}{S_z}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{w \cdot S_z}{\nu}\right)^{0,65} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (11.1.5)$$

$$\alpha_k = 0,23 \cdot 1 \cdot 1,882^{0,2} \cdot \frac{0,0527}{0,00416} \cdot \left(\frac{0,038}{0,00416}\right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{0,013}{0,00416}\right)^{-0,14} \cdot \left(\frac{5,4 \cdot 0,00416}{0,000052}\right)^{0,65}$$

$$\alpha_k = 44,586 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Oprava na počet podélných řad  $c_z$ :

$$z > 10 \Rightarrow c_z = 1$$

Parametr určující uspořádání trubek ve svazku:

$$\varphi_{\sigma} = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} = \frac{3,684 - 1}{1,579 - 1} = 1,882 \quad (11.1.6)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot 3,684^2 + 1,579^2} = 2,426 \quad (11.1.7)$$

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} = \frac{0,140}{0,038} = 3,684$$

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} = \frac{0,060}{0,038} = 1,579$$

**Redukovaný součinitel přestupu tepla konvekci žebrovaných trubek**

$$\alpha_{1r} = \left[ \frac{S_z}{S} \cdot E \cdot \mu + \frac{S_h}{S} \right] \cdot \frac{\Psi_z \cdot \alpha_k}{1 + \varepsilon \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k} [W/m^2K] \quad (11.1.8)$$

$$\alpha_{1r} = [0,917 \cdot 0,905 \cdot 1 + 0,083] \cdot \frac{0,85 \cdot 44,586}{1 + 0,0043 \cdot 0,85 \cdot 44,586} = 29,749 [W/m^2K]$$

**Podíl výhřevných ploch žebor a celkové plochy ze strany spalin**

$$\frac{S_z}{S} = \frac{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1}{\left(\frac{D_z}{D}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{S_z}{D} - \frac{\delta_z}{D}\right)} = \frac{\left(\frac{0,064}{0,038}\right)^2 - 1}{\left(\frac{0,064}{0,038}\right)^2 - 1 + 2 \cdot \left(\frac{0,00416}{0,038} - \frac{0,001}{0,038}\right)} = 0,917 \quad (11.1.9)$$

Podíl volných částí trubky a celkové plochy na straně spalin

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} = 0,083$$

Koeficient charakterizující nerovnoměrné rozdělení  $\alpha_k$  po povrchu žebra

Pro žebra s kruhovým základem je  $\Psi_z = 0,85$

Součinitel znečištění pro spalování plynu:

$$\varepsilon = 0,0043$$

**Součinitel efektivnosti žebra**

Určuje se v závislosti na  $\beta \cdot h_z$  a  $\frac{D_z}{D}$

$$\beta = \sqrt{\frac{2 \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k}{\delta_z \cdot \lambda_z \cdot (1 + \varepsilon \cdot \Psi_z \cdot \alpha_k)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 44,586}{0,001 \cdot 43,5 \cdot (1 + 0,0043 \cdot 0,85 \cdot 44,586)}} = 38,71 \quad (11.1.10)$$

$$\beta \cdot h_z = 37,707 \cdot 0,013 = 0,503$$

$$\frac{D_z}{D} = \frac{0,064}{0,038} = 1,684$$

$$E = 0,905$$

Součinitel tepelné vodivosti žebra

$$\lambda_z = 43,5 \text{ [W/mK]}$$

Součinitel rozšíření žebra

$$\mu = 1$$

Teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách

$$T_z = t_{st\ m} + \Delta t = 222 + \Delta t = 247 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (11.1.11)$$

Při spalování plynu pro všechny výhřevné plochy je  $\Delta t = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Střední teplota média v trubkách:

$$t_{st\ m} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{160 + 284}{2} = 222 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_1 = 160 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_2 = 284 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

**11.2.3 Střední logaritmický teplotní spád**

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{188,883 - 45,42}{\ln\left(\frac{188,883}{45,42}\right)} = 100,664 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (10.2.12)$$

$$\Delta t_v = 472,883 - 284 = 188,883 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = 205,42 - 160 = 45,42 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### 11.2.4 Výhřevná plocha svazku

$$S = 1,1387 \cdot 27 \cdot 26 \cdot 6,602 = 5277 \text{ [m}^2\text{]} \quad (11.1.12)$$

### 11.2.5 Rovnice sdílení tepla

$$Q_k^{P5} = \frac{k \cdot \Delta t \cdot S}{M_{pv}} \cdot 10^{-3} = \frac{25,286 \cdot 100,664 \cdot 5277}{2,885} \cdot 10^{-3} \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (11.1.13)$$

$$Q_k^{P5} = 4656,361 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

### 11.2.6 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla

$$\Delta Q = \frac{Q_b - Q_k}{Q_b} \cdot 100 = \frac{4654,572 - 4656,361}{4654,572} \cdot 100 = -0,038 \text{ [%]} \quad (11.1.14)$$

Odchylka je menší jak 2%, proto můžeme výpočet teploty plochy považovat za ukončený.

## 12 Oblast regeneračního ohříváku vzduchu typu Ljungström

### 12.1 Rovnice tepelné bilance na straně média

$$Q_{vz} = \left( \beta''_{ovz} + \frac{\Delta\alpha_{ovz}}{2} + \beta_{rec} \right) \cdot (I''_{vz\ min} - I'_{vz\ min}) [kJ/m^3] \quad (12.1.1)$$

$$Q_{vz} = \left( 1,01 + \frac{0,0112}{2} + 0 \right) \cdot (1829,925 - 380,007) = 1536,913 [kJ/m^3]$$

Profuk ze strany vzduchu do spalin

$$\Delta\alpha_{ovz} = 0,112$$

Součinitel přebytku vzduchu na výstupu z ohříváku

$$\beta''_{ovz} = 1,01$$

Entalpie výstupního vzduchu z ohříváku

$$I''_{vz\ min} = 1829,925 [kJ/m^3]$$

Entalpie vstupního vzduchu do ohříváku

$$I'_{vz\ min} = 380,007 [kJ/m^3]$$

### 12.2 Rovnice tepelné bilance na straně spalin

$$Q_b = \varphi \cdot (I_1 - I_2 + \Delta I) \Rightarrow I_1 = \frac{Q_{vz}}{\varphi} + I_2 - \Delta I = 3754,234 \quad (12.2.1)$$

Střední teplota přísávaného vzduchu

$$\overline{t_{vz}} = \frac{t_{vz\ 1} + t_{vz\ 2}}{2} = \frac{30 + 144}{2} = 87 [^{\circ}C] \quad (12.2.2)$$

Množství tepla s přísávaným falešným vzduchem

$$\Delta I = \Delta\alpha \cdot I_{vz\ min} = 0,112 \cdot 1102,02 = 123,426 [kJ/m^3] \quad (12.2.3)$$

## 12.3 Oblast ohříváku vzduchu

Ohřívák vzduchu				
		Horký konec	Studený konec	
Průměr rotoru	<b>D</b>	5,8	5,8	[m]
Výška výplně rotoru	<b>h</b>	0,400	0,300	[m]
Typ výplně rotoru	–	vlnitý plech	vlnitý plech	[–]
Součinitel rotoru	<b>K<sub>r</sub></b>	0,91	0,91	[–]
Součinitel výplně rotoru	<b>K<sub>v</sub></b>	0,86	0,81	[–]
Ekvivalentní průměr	<b>d<sub>e</sub></b>	0,0078	0,0098	[m]
Velikost oboustranné výchřevné plochy	<b>S<sub>1</sub></b>	440	325	[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]

Ohřívák vzduchu je rozdělen na 45 segmentů

24 segmentů je pro spalínovou část.

$$X_{sp} = \frac{24}{45} = 0,533 \quad (12.3.1)$$

19 segmentů pro vzduchovou část.

$$X_{vz} = \frac{19}{45} = 0,422 \quad (12.3.2)$$

2 segmenty pro těsnicí část.

$$X_o = \frac{2}{45} = 0,044 \quad (12.3.3)$$

Množství vstupního vzduchu

$$M_{vz} = O_{vz} \cdot M_p = 37,582 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (12.3.4)$$

Množství vstupních spalín

$$M_{sp} = O_{sp\ r4} \cdot M_p = 48,377 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (12.3.5)$$

Střední teplota proudu spalín

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{205,42 + 128,302}{2} = 166,861 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (12.3.6)$$

Rychlost spalin v horkém konci

$$W_{sp}^H = \frac{4 \cdot M_{sp}}{\pi \cdot X_{sp} \cdot D^2 \cdot K_r \cdot K_v \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{\vartheta}{273,15}\right) \quad (12.3.7)$$

$$W_{sp}^H = \frac{4 \cdot 48,377}{\pi \cdot 0,533 \cdot 5,8^2 \cdot 0,91 \cdot 0,86 \cdot 1} \cdot \left(1 + \frac{166,861}{273,15}\right)$$

$$W_{sp}^H = 7,067 \text{ [m/s]}$$

Rychlost vzduchu v horkém konci

$$W_{vz}^H = \frac{M_{vz}}{M_{sp}} \cdot \frac{X_{sp}}{X_{vz}} \cdot W_{sp}^H = \frac{37,582}{48,377} \cdot \frac{0,533}{0,422} \cdot 7,067 = 6,935 \text{ [m/s]} \quad (12.3.8)$$

Průřez proudu spalin

$$F_{sp} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot X_{sp} \cdot K_r \cdot K_v = \frac{\pi}{4} \cdot 5,8^2 \cdot 0,533 \cdot 0,91 \cdot 0,86 = 11,028 \text{ [m}^2\text{]} \quad (12.3.9)$$

Průřez proudu vzduchu

$$F_{vz} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot X_{vz} \cdot K_r \cdot K_v = \frac{\pi}{4} \cdot 5,8^2 \cdot 0,422 \cdot 0,91 \cdot 0,86 = 8,730 \text{ [m}^2\text{]} \quad (12.3.10)$$

Velikost oboustranné výhřevné plochy horkého konce

$$S^H = 0,95 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot K_r \cdot S_1 \cdot h = 0,95 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 5,8^2 \cdot 0,91 \cdot 440 \cdot 0,4 = 4019,977 \text{ [m}^2\text{]} \quad (12.3.11)$$

Rychlost spalin ve studeném konci

$$W_{sp}^S = \frac{4 \cdot M_{sp}}{\pi \cdot X_{sp} \cdot D^2 \cdot K_r \cdot K_v \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{\vartheta}{273,15}\right) \quad (12.3.12)$$

$$W_{sp}^S = \frac{4 \cdot 48,377}{\pi \cdot 0,533 \cdot 5,8^2 \cdot 0,91 \cdot 0,81 \cdot 1} \cdot \left(1 + \frac{166,861}{273,15}\right)$$

$$W_{sp}^S = 7,523 \text{ [m/s]}$$

Rychlost vzduchu ve studeném konci

$$W_{vz}^S = \frac{M_{vz}}{M_{SP}} \cdot \frac{X_{sp}}{X_{vz}} \cdot W_{sp}^S = \frac{37,582}{48,377} \cdot \frac{0,533}{0,422} \cdot 7,503 = 7,363 \text{ [m/s]} \quad (12.3.13)$$

Průřez proudu spalín

$$F_{sp} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot X_{sp} \cdot K_r \cdot K_v = \frac{\pi}{4} \cdot 5,8^2 \cdot 0,533 \cdot 0,91 \cdot 0,81 \cdot 1,02 = 10,594 \text{ [m}^2\text{]} \quad (12.3.14)$$

Průřez proudu vzduchu

$$F_{vz} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot X_{vz} \cdot K_r \cdot K_v = \frac{\pi}{4} \cdot 5,8^2 \cdot 0,422 \cdot 0,91 \cdot 0,81 \cdot 1,02 = 8,387 \text{ [m}^2\text{]} \quad (12.3.15)$$

Velikost oboustranné výhřevné plochy studeného konce

$$S^S = 0,95 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot K_r \cdot S_1 \cdot h = 0,95 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 5,8^2 \cdot 0,91 \cdot 325 \cdot 0,3 = 2226,976 \text{ [m}^2\text{]} \quad (12.3.16)$$

### 12.3.1 Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}\right)} = \frac{61,42 - 98,302}{\ln\left(\frac{61,42}{98,302}\right)} = 73,128 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (12.3.17)$$

$$\Delta t_v = 205,42 - 144 = 61,42 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta t_m = 128,302 - 30 = 98,302 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### 12.3.2 Součinitel prostupu tepla

Pro horký konec

$$k^H = \frac{\xi}{\frac{1}{X_{sp} \cdot \alpha_1^H} + \frac{1}{X_{vz} \cdot \alpha_2^H}} = \frac{0,9}{\frac{1}{0,533 \cdot 47,247} + \frac{1}{0,422 \cdot 45,859}} = 9,854 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (12.3.18)$$

Pro studený konec

$$k^S = \frac{\xi}{\frac{1}{X_{sp} \cdot \alpha_1^S} + \frac{1}{X_{vz} \cdot \alpha_2^S}} = \frac{0,9}{\frac{1}{0,533 \cdot 36,831} + \frac{1}{0,422 \cdot 34,749}} = 7,559 \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (12.3.19)$$



**12.3.3 Součinitel přestupu tepla na straně spalin**

Pro horký konec

$$\alpha_1^H = A \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{W_{sp}^H \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l [W/m^2K] \quad (12.3.20)$$

$$\alpha_1^H = 0,027 \cdot \frac{0,037}{0,0078} \cdot \left( \frac{7,067 \cdot 0,0078}{0,000028} \right)^{0,8} \cdot 0,693^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_1^H = 47,247 [W/m^2K]$$

Pro studený konec

$$\alpha_1^S = 0,021 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{W_{sp}^S \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l [W/m^2K] \quad (12.3.21)$$

$$\alpha_1^S = 0,021 \cdot \frac{0,037}{0,0098} \cdot \left( \frac{7,503 \cdot 0,0078}{0,000028} \right)^{0,8} \cdot 0,692^{0,4} \cdot 1 \cdot 1$$

$$\alpha_1^S = 36,831 [W/m^2K]$$

Vlastnosti spalin

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu spalin 166,861 [°C]**

$$\lambda = 0,037 [W/mK]$$

**Součinitel kinematické viskozity  $\nu$  pro střední teplotu spalin 166,861 [°C]**

$$\nu = 0,000028 [m^2/s]$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu spalin 166,861 [°C]**

$$Pr = 0,692 [-]$$

Opravný koeficient

$$c_t = 1$$

Oprava poměrnou délkou

$$c_l = 1$$

**12.3.4 Součinitel přestupu tepla na straně vzduchu**

Pro horký konec

$$\alpha_2^H = A \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{W_{vz}^H \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l [W/m^2K] \quad (12.3.22)$$

$$\alpha_2^H = 0,027 \cdot \frac{0,031}{0,0078} \cdot \left( \frac{6,935 \cdot 0,0078}{0,000022} \right)^{0,8} \cdot 0,7^{0,4} \cdot 0,947 \cdot 1$$

$$\alpha_2^H = 45,859 [W/m^2K]$$

Pro studený konec

$$\alpha_2^S = 0,021 \cdot \frac{\lambda}{d_e} \cdot \left( \frac{W_{vz}^S \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot c_t \cdot c_l [W/m^2K] \quad (12.3.23)$$

$$\alpha_2^S = 0,021 \cdot \frac{0,031}{0,0098} \cdot \left( \frac{7,363 \cdot 0,0098}{0,000022} \right)^{0,8} \cdot 0,7^{0,4} \cdot 0,947 \cdot 1$$

$$\alpha_2^S = 34,749 [W/m^2K]$$

Vlastnosti vzduchu

$$t_{st} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{30 + 144}{2} = 87 [^\circ C] \quad (12.3.24)$$

**Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pro střední teplotu spalin 87 [°C]**

$$\lambda = 0,031 [W/mK]$$

**Součinitel kinematické viskozity  $\nu$  pro střední teplotu spalin 87 [°C]**

$$\nu = 0,000022 [m^2/s]$$

**Prandtlovo číslo  $Pr$  pro střední teplotu spalin 87 [°C]**

$$Pr = 0,7 [-]$$

Opravný koeficient

$$c_t = \left( \frac{T}{T_{st}} \right)^{0,5} = \left( \frac{87,5 + 273,15}{129,318 + 273,15} \right)^{0,5} = 0,947 \quad (12.3.25)$$

Oprava poměrnou délkou

$$c_l = 1$$

Teplota stěny listů

$$T_{st} = \frac{X_{sp} \cdot \vartheta + X_{vz} \cdot t}{X_{sp} + X_{vz}} = \frac{0,533 \cdot 166,861 + 0,422 \cdot 87,5}{0,533 + 0,422} = 131,574[^\circ\text{C}] \quad (12.3.26)$$

## 12.4 Tepelný výkon horkého konce

$$Q^H = \frac{S^H \cdot k^H \cdot \Delta t}{M_p} \cdot 10^{-3} = \frac{4019,977 \cdot 9,854 \cdot 73,128}{2,885} \cdot 10^3 = 1076,902 \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (12.4.1)$$

## 12.5 Tepelný výkon studeného konce

$$Q^S = \frac{S^S \cdot k^S \cdot \Delta t}{M_p} \cdot 10^{-3} = \frac{2226,976 \cdot 7,559 \cdot 73,128}{2,885} \cdot 10^3 = 457,612 \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (12.5.1)$$

## 12.6 Celkový tepelný výkon ohříváku

$$Q_{celk} = Q^H + Q^S = 1076,902 + 457,612 = 1534,514 \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (12.6.1)$$

### 12.6.1 Kontrola odchylky mezi bilančním teplem a teplem z prostupu tepla

$$\Delta Q = \frac{Q_{vz} - Q_{celk}}{Q_{vz}} \cdot 100 = \frac{1536,913 - 1534,514}{1536,913} \cdot 100 = -0,156 \text{ [%]} \quad (12.6.2)$$

Odchylka je menší jak 2%, proto můžeme výpočet teploty plochy považovat za ukončený.

### 13 Celková bilance kotle

$$\sum Q_i = 15469,833 + 6102,295 + 3376,2886 + 492,121 + 1807,32 + 1853,3321 + 42,318 + 4656,361 \quad (13.1.1)$$

$$\sum Q_i = 33721,322 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$$

$$\Delta Q_{\text{celkové}} = Q_P^P \cdot \eta_k - \sum Q_i = 35,99 \cdot 0,937 - 33772,86 = -73,2003 \text{ [kJ/m}^3\text{]} \quad (13.1.2)$$

#### 13.1 Odchylka

$$\Delta Q = \frac{\Delta Q_{\text{celkové}}}{Q_P^P} \cdot 100 = -0,203 \text{ [%]} \quad (13.1.3)$$

Odchylka je menší jak 0,5 %, proto můžeme výpočet plochy považovat za ukončený.

## 14 Závěr

Po změně palivové základny z práškového hnědého uhlí na zemní plyn, bylo cílem této práce provést kontrolní výpočet teplosměnných ploch a navrhnout případné konstrukční úpravy kotle s ohledem na investiční náklady a stanovené emisní limity. Emisní limit pro  $\text{NO}_x$  je  $60 \text{ mg/Nm}^3$  a pro CO je  $15 \text{ mg/Nm}^3$ .

Výsledky výpočtů:

Potřebné množství paliva	$2,885 \text{ m}^3/\text{s}$
Účinnost kotle	93,711 %
Výrobní teplo páry	97,291 MW
Teplota v ohništi	1989,037 °C
Výstupní teplota spalin ze spalovací komory	1247,341 °C
Teplota ohřátého vzduchu	144 °C

Výše zmíněných výsledků bylo dosaženo změnou polohy hořáků, které bylo nutnou posunout nad původní pozici o 3,986 m.

U ekonomizéru bylo nutné vyměnit hladké teplosměnné trubky za žebrované, s výškou žeber 13 mm, šířkou 1mm a četností 240 žeber na metr trubky.

Poslední úprava spočívala v zaslepení dna spalovací komory

## 15 Seznam použité literatury

- [1] Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalínových výměníků, skriptum ČVUT, Praha 1999
- [2] Budaj, F.: Parní kotle podklady pro tepelný výpočet, skriptum VUT, Brno 1992
- [3] Microsoft Office Excel 2007

## 16 Seznam tabulek

Tab 2-1 Složení zemního plynu.....	10
Tab 2-2 Entalpie složek spalin.....	14
Tab 2-3 I-t tabulka vzduchu a produktů spalování.....	14

## 17 Seznam obrázků

Obr. 1 I-t diagram spalin.....	15
Obr. 2 I-t diagram spalin na recirkulaci.....	15

## 18 Seznam použitých symbolů

$a$	-	stupeň černosti plamene
$a_0$	-	stupeň černosti ohniště
$a_{st}$	-	stupeň černosti povrchu stěn
$a_{pi}$	-	efektivní stupeň černosti plamene
$a_{sv}$	-	stupeň černosti svítivé části plamene
$a_{nz}$	-	stupeň černosti nesvítivé části plamene
$Bo$	-	Boltzmanovo číslo
$c$	$\text{kJ/m}^3\text{K}$	měrné teplo
$c_s$	-	oprava svazku
$c_z$	-	oprava na počet podélných řad
$D$	$m$	vnější průměr trubky
$d$	$m$	vnitřní průměr trubky
$d_e$	$m$	ekvivalentní průměr
$f$	$m^2$	průřez pro páru, vodu
$f$	-	součinitel vlhkosti vzduchu
$F_{sp}, F_1, F_2$	$m^2$	světlý průřez kanálu
$F_{us}$	$m^2$	účinná sálavá plocha
$F_{st}$	$m^2$	povrch stěn
$h_k$	$m$	výška hořáku
$h_c$	$m$	výška ohniště
$i_p$	$\text{kJ/m}^3$	fyzické teplo paliva
$i_{pp}$	$\text{kJ/kg}$	entalpie přehřáté páry
$i_{nv}$	$\text{kJ/m}^3$	entalpie napájecí vody
$\Delta i$	$\text{kJ/m}^3$	rozdílné entalpie
$i_1$	$\text{kJ/kg}$	entalpie média na vstupu
$i_2$	$\text{kJ/kg}$	entalpie média na výstupu
$I_0$	$\text{kJ/m}^3$	entalpie spalin na konci ohniště
$I_1$	$\text{kJ/m}^3$	vstupní entalpie spalin
$I_2$	$\text{kJ/m}^3$	výstupní entalpie spalin
$I_u$	$\text{kJ/m}^3$	užitečné teplo uvolněné v ohništi
$I_{SPod}$	$\text{kJ/m}^3$	entalpie spalin na konci kotle

$I_{SP}$	$\text{kJ/m}^3$	entalpie spalin
$I_{SPmin}$	$\text{kJ/m}^3$	minimální entalpie spalin
$I_{SPr}$	$\text{kJ/m}^3$	entalpie spalin s recirkulací
$I_{VZ}$	$\text{kJ/m}^3$	entalpie vzduchu
$I_{VZmin}$	$\text{kJ/m}^3$	minimální entalpie vzduchu
$k$	$\text{W/m}^2\text{K}$	součinitel prostupu tepla
$k_{sp}$	$1/\text{mMPa}$	součinitel zeslabení sálání triatomovými plyny
$k_c$	$1/\text{mMPa}$	součinitel zeslabení sálání částicemi sazí
$l_{ti}$	$\text{m}$	délka trubky
$M$	-	součinitel (výpočet ohniště)
$M_{pv}, M_p$	$\text{m}^3/\text{s}$	množství paliva
$M_{pp}$	$\text{kg/s}$	množství přehřáté páry
$M_{nv}$	$\text{kg/s}$	množství napájecí vody
$M_o$	$\text{kg/s}$	množství odluhu
$M_{op}$	$\text{kg/s}$	množství odběru páry
$M_{mp}$	$\text{kg/s}$	množství do mezipřehříváku páry
$n_{tr}$	-	počet trubek
$n_h$	-	počet hadů
$n_1, n_2$	-	počet hořáků
$O$	$\text{m}$	obvod průřezu kanálu
$O_{SPmin}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	minimální množství spalin
$O_{SP}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	skutečné množství spalin
$O_{SPod}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	množství spalin na výstupu kotle
$O_{SPr}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	množství spalin s recirkulací spalin
$O_r$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	množství recirkulovaných spalin
$O_{VZmin}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	minimální objem vlhkého vzduchu
$O_{VZ}$	$\text{m}^3/\text{m}^3$	skutečné množství vzduchu
$O_{SP.C}$	$\text{kJ/m}^3\text{K}$	střední celkové měrné teplo spalin
$p$	$\text{MPa}$	tlak
$p_{nv}$	$\text{MPa}$	tlak napájecí vody
$p_{sp}$	$\text{MPa}$	celkový parciální tlak
$Pr$	-	Prandtlovo číslo
$Q_b$	$\text{kJ/m}^3$	bilanční teplo



$Q_v$	$\text{kJ/m}^3$	teplo ze sdílení tepla spalín a média, výrobní teplo páry
$Q_p^p$	$\text{kJ/m}^3$	teplo přivedené do kotle
$Q_i^r$	$\text{kJ/m}^3$	výhřevnost paliva
$Q_{vzv}$	$\text{kJ/m}^3$	teplo přivedené vzduchem
$Q_s$	$\text{kJ/m}^3$	množství tepla odevzdané v ohništi do stěn
$q$	$\text{kW/m}^2$	střední tepelné zatížení stěn ohniště
$q_v$	$\text{kW/m}^3$	objemové zatížení ohniště
$r$	-	koeficient recirkulace
$r_{H_2O}$	-	objemová část vodní páry
$r_{RO_2}$	-	objemová část tříatomových plynů
$r_{sp}$	-	součet objemových částí tříatomových plynů
$S$	$m$	efektivní tloušťka sálavé vrstvy
$S$	$m^2$	výhřevná plocha
$S_1$	$m$	příčná rozteč
$S_2$	$m$	podélná rozteč
$t$	$^{\circ}\text{C}$	teplota
$t_1$	$^{\circ}\text{C}$	vstupní teplota média
$t_2$	$^{\circ}\text{C}$	výstupní teplota média
$t_{st}^m$	$^{\circ}\text{C}$	střední teplota média
$t_z$	$^{\circ}\text{C}$	teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách
$\Delta t$	$^{\circ}\text{C}$	teplotní spád
$\Delta t_m$	$^{\circ}\text{C}$	menší rozdíl teplot
$\Delta t_v$	$^{\circ}\text{C}$	větší rozdíl teplot
$T$	$K$	střední teplota spalín
$T_0$	$K$	teplota spalín na konci ohniště
$T_a$	$K$	teplota nechlazeného plamene
$T_z$	$K$	teplota vnějšího povrchu nánosů na trubkách
$tl.$	$m$	tloušťka stěny trubky
$v$	$\text{m}^3/\text{kg}$	měrný objem média
$V_0$	$\text{m}^3$	objem ohniště
$V_{abh}$	$\text{m}^3$	objem ohniště (kvádr)
$V_{vnb}$	$\text{m}^3$	objem ohniště (vysypka)

$V_{yub}$	$m^3$	objem ohniště (nos)
$w$	$m/s$	rychlost spalin, média
$x_i$	-	úhlový součinitel
$x_h$	-	poměrná výška hořáků
$\Delta x$	-	oprava (hořáky)
$z$	-	počet řad
$Z_{co}$	%	ztráta hořlavinou ve spalinách
$Z_{so}$	%	ztráta sdílením tepla
$Z_k$	%	komínová ztráta
$Z_c$	%	ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
$\alpha, \alpha_0, \beta$	-	přebytek vzduchu
$\alpha_1$	$W/m^2K$	součinitel přestupu tepla na straně spalin
$\alpha_2$	$W/m^2K$	součinitel prostupu tepla na straně média
$\alpha_k$	$W/m^2K$	součinitel prostupu tepla konvekcí
$\alpha_s$	$W/m^2K$	součinitel prostupu tepla sáláním
$\omega$	-	součinitel omývání desek
$\xi$	-	součinitel zanesení stěn
$\eta$	$Pas$	dynamická viskozita
$\eta_k$	%	tepelná účinnost kotle
$\lambda$	$W/mK$	součinitel tepelné vodivosti
$\nu$	$m^2/s$	kinematická viskozita
$\sigma_1$	-	poměrná příčná rozteč
$\sigma_2$	-	poměrná podélná rozteč
$\sigma'_2$	-	poměrná úhlopříčná rozteč
$\pi$	-	Ludolfovo číslo
$\varphi$	-	součinitel uchování tepla
$\psi$	-	součinitel tepelné efektivnosti
$\vartheta_0$	°C	teplota na konci ohniště
$\vartheta_a$	°C	teplota nechlazeného plamene

## **19 Seznam příloh**

- 1- Výkres kotle